

Sumari

SUMARI	1
A. RADIOMETRIA I INSTRUMENTACIÓ INFRAROJA. FONAMENTS TEÒRICS	3
A.1. Principis bàsics de radiació tèrmica i radiometria	3
A.2. Conceptes generals d'instrumentació infraroja	12
A.3. Mesures quantitatives amb càmeres termogràfiques	15
A.3.1. Model de sensor	15
A.3.2. Model radiomètric de la càmera IR	17
A.3.3. Model de temperatura de la càmera IR	18
B. RESULTATS OBTINGUTS EN LES PROVES EXPERIMENTALS	25
B.1. Resultats de la Prova 1 (300106_1)	25
B.2. Resultats de la Prova 2 (010206_1)	34
B.3. Resultats de la Prova 3 (010206_2)	43
B.4. Resultats de la Prova 4 (010206_3)	52
C. PRESSUPOST	61
C.1. Instal·lació experimental	61
C.2. Recursos materials	62
C.3. Recursos humans	64
C.4. Import total	65
D. AVALUACIÓ D'IMPACTE AMBIENTAL	67
D.1. Descripció general del projecte	67
D.2. Estudi d'alternatives	68
D.3. Descripció del medi	69
D.4. Identificació i valoració dels impactes sobre el medi	70
D.5. Mesures correctores previstes	73





A. Radiometria i instrumentació infraroja. Fonaments teòrics

A.1. Principis bàsics de radiació tèrmica i radiometria

Tot cos que estigui a una temperatura superior al zero absolut ($-273,15^{\circ}\text{C}$) emet energia en forma d'ones electromagnètiques degut a l'agitació atòmica i molecular dels elements que el constitueixen. Aquestes ones, associacions de camps elèctrics i magnètics, es propaguen a la velocitat de la llum en el buit i són capaces de travessar o interaccionar amb el medi físic en funció de les característiques d'aquest i de les pròpies ones electromagnètiques. Aquest tipus de transferència d'energia es coneix com a radiació.

El paràmetre més característic de la radiació electromagnètica és la longitud d'ona (λ) que està relacionat, per una banda, amb la naturalesa de la mateixa radiació i, per una altra, amb els efectes que aquesta produeix o amb la forma en què pot ser percebuda. Així, com es veu a la Figura A.1, l'espectre electromagnètic es divideix en una sèrie de regions o bandes amb diferents longituds d'ona, des de les més baixes, que es corresponen amb freqüències i energies grans (raigs gamma o raigs X) fins a les longituds d'ona més elevades i, per tant, de menor freqüència i energia (microones i ones de ràdio). Dins d'aquest espectre també es troba la regió ultraviolada (10-380 nm), el rang espectral del visible (380-780 nm) i la regió infraroja (780- 10^6 nm). La radiació tèrmica s'emet dins la banda espectral que comprèn el visible i l'infraroig (100- 10^6 nm).

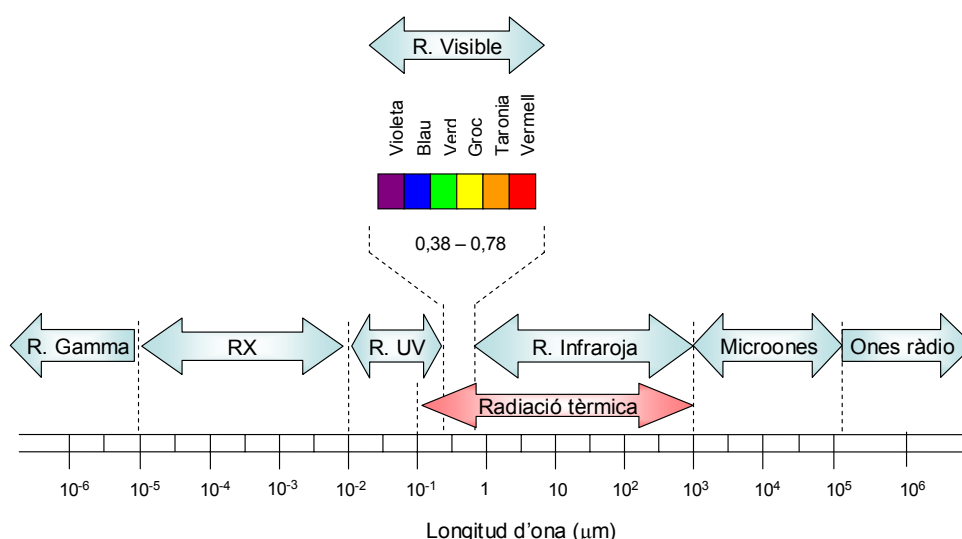


Fig. A.1. Espectre electromagnètic.



La part de l'òptica que es dedica a la mesura de la radiació electromagnètica és la radiometria. Les principals quantitats radiomètriques, en termes de magnituds físiques, que es fan servir per a caracteritzar el contingut en energia de la radiació es descriuen a continuació. Amb tot, cal presentar prèviament algunes definicions bàsiques per tal d'entendre correctament les diferents magnituds.

Es considera un element de superfície dA_1 que emet en una certa direcció de l'espai, $(\theta, \Phi)^1$ en coordenades esfèriques; d'altra banda, es considera un altre element de superfície dA_n a través del qual passa aquesta emissió, segons mostra la Figura A.2.

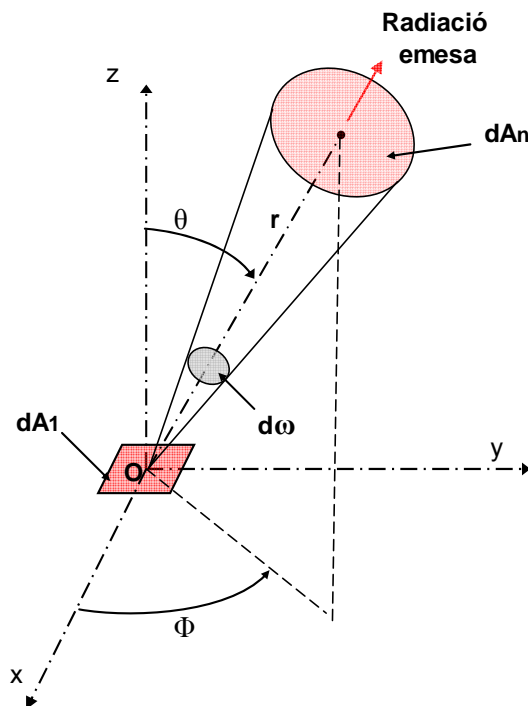


Fig. A.2. Emissió de radiació de dA_1 en un angle sòlid subtendit per dA_n en un punt de dA_1 .

S'anomena angle sòlid subtendit per dA_n des d'un punt O d' A_1 , a l'àrea $d\omega$ de la superfície esfèrica de radi unitat centrada al punt O, que és interceptada pel con que té per vèrtex el punt O i per generatrius les que passen pel contorn de dA_n . Es mesura en estereoradians (sr) i es calcula com:

$$d\omega = \frac{dA_n}{r^2} \quad (\text{A.1})$$

¹ θ és l'angle entre l'eix z i la línia que uneix l'origen amb el punt P ($0 < \theta < \pi$).

Φ és l'angle entre l'eix x i la línia que uneix l'origen amb la projecció del punt P sobre el pla xy ($0 < \Phi < 2\pi$).



En tant que la superfície dA_n és un element normal a la direcció (θ, Φ) , pot expressar-se, per a una superfície esfèrica, com $dA_n = r^2 \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\Phi$; $d\omega$ pot escriure's, conseqüentment, com:

$$d\omega = \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\Phi \quad (\text{A.2})$$

Les principals magnituds radiomètriques que cal considerar són:

- Flux radiant (q): equival a la potència transportada per la radiació [W] i és la magnitud bàsica que cal considerar.

- Intensitat de radiació espectral ($I_{\lambda,e}$): flux d'energia radiant emesa a una longitud d'ona λ en la direcció (θ, Φ) , per unitat d'àrea de la superfície que emet normal a aquesta direcció, per unitat d'angle sòlid format en aquesta direcció i per interval de longitud d'ona $d\lambda$. Es mesura en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1} \cdot \mu\text{m}^{-1}$.

$$I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \Phi) = \frac{dq}{dA_I \cdot \cos \theta \cdot d\omega \cdot d\lambda} \quad (\text{A.3})$$

Si es defineix $(dq/d\lambda) = dq_\lambda$ com el flux de radiació de longitud d'ona λ que deixa dA_I i passa a través de dA_n , s'obté:

$$dq_\lambda = I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \Phi) \cdot dA_I \cdot \cos \theta \cdot d\omega \quad (\text{A.4})$$

Aquesta darrera equació pot expressar-se per unitat d'àrea de la superfície emissora, és a dir, com el flux de radiació espectral associat. Es mesura en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$.

$$dq''_\lambda = I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \Phi) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\Phi \quad (\text{A.5})$$

- Intensitat de radiació total (I_e): flux de radiació emesa a totes les longituds d'ona possibles en la direcció (θ, Φ) , per unitat d'àrea de la superfície que emet normal a aquesta direcció i per unitat d'angle sòlid format en aquesta direcció. Es mesura en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{sr}^{-1}$.

$$I_e = \int_0^\infty I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \Phi) d\lambda \quad (\text{A.6})$$



- Poder emissiu espectral (E_λ): flux de radiació de longitud d'ona λ que s'emet des d'una superfície en totes les direccions, per unitat de longitud d'ona $d\lambda$ i per unitat de superfície. Es mesura en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ i es pot expressar en funció de la intensitat espectral tal i com s'indica:

$$E_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \Phi) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\Phi \quad (\text{A.7})$$

- Poder emissiu total (E): flux de radiació que s'emet per unitat d'àrea a totes les longituds d'ona possibles i en totes les direccions possibles. Es mesura en W/m^2 i equival a:

$$E = \int_0^\infty E_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (\text{A.8})$$

S'entén per emissor difusiu la superfície en la qual la intensitat de la radiació emesa és independent de la direcció, per tant $I_{\lambda,e}(\lambda, \theta, \Phi) = I_{\lambda,e}(\lambda)$. Així, s'obté:

$$E_\lambda(\lambda) = \pi \cdot I_{\lambda,e}(\lambda) \quad (\text{A.9})$$

$$E = \pi \cdot I_e \quad (\text{A.10})$$

- Irradiació espectral (G_λ): flux de radiació de longitud d'ona λ que incideix sobre una superfície provinent de l'emissió i la reflexió que ocorre en altres superfícies, per unitat de longitud d'ona $d\lambda$ i per unitat de superfície. Es mesura en $\text{W}\cdot\text{m}^{-2}\cdot\mu\text{m}^{-1}$ i s'expressa en funció de la intensitat espectral de radiació incident $I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \Phi)$ de la forma:

$$G_\lambda(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,i}(\lambda, \theta, \Phi) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\Phi \quad (\text{A.11})$$

- Irradiació total (G): flux de radiació que incideix sobre una superfície per unitat d'àrea a totes les longituds d'ona possibles i en totes les direccions possibles. Es mesura en W/m^2 i equival a:

$$G = \int_0^\infty G_\lambda(\lambda) d\lambda \quad (\text{A.12})$$



Si la radiació incident és difusa, és a dir, independent de la direcció, es té:

$$G_{\lambda}(\lambda) = \pi \cdot I_{\lambda,i}(\lambda) \quad (\text{A.13})$$

$$G = \pi \cdot I_i \quad (\text{A.14})$$

on: I_i : intensitat total de radiació incident.

- Radiositat espectral (J_{λ}): flux de radiació de longitud d'ona λ que abandona una superfície, tant per l'emissió directa com per la fracció reflectida de la irradiació (Fig. A.3), per unitat de longitud d'ona $d\lambda$ i per unitat de superfície. Es mesura en $\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \mu\text{m}^{-1}$ i s'expressa en funció de la intensitat espectral $I_{\lambda,e+r}(\lambda, \theta, \Phi)$ de la forma:

$$J_{\lambda}(\lambda) = \int_0^{2\pi} \int_0^{\pi/2} I_{\lambda,e+r}(\lambda, \theta, \Phi) \cdot \cos \theta \cdot \sin \theta \cdot d\theta \cdot d\Phi \quad (\text{A.15})$$

on: $I_{\lambda,e+r}$: intensitat espectral de radiació emesa i reflectida de la irradiació.

- Radiositat total (J): flux de radiació que abandona una superfície per unitat d'àrea a totes les longituds d'ona possibles i en totes les direccions possibles. Es mesura en W/m^2 i equival a:

$$J = \int_0^{\infty} J_{\lambda}(\lambda) d\lambda \quad (\text{A.16})$$

De la mateixa manera que en casos anteriors, si la superfície és un cos emissor i reflector difusiu es pot escriure:

$$J_{\lambda}(\lambda) = \pi \cdot I_{\lambda,e+r}(\lambda) \quad (\text{A.17})$$

$$J = \pi \cdot I_{e+r} \quad (\text{A.18})$$

on: I_{e+r} : intensitat total de radiació emesa i reflectida de la irradiació.



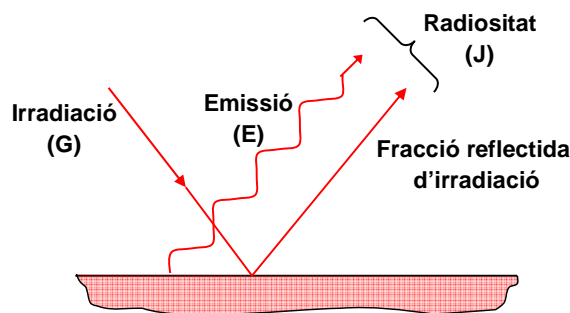


Fig. A.3. Radiositat d'una superfície.

L'energia radiant que emet una substància, en incidir sobre la superfície d'un cos, pot ser absorbida, reflectida o transmesa, total o parcialment, de manera que s'expressa la radiació incident en un cos com:

$$I_i = I_a + I_r + I_t \quad (\text{A.19})$$

on:

- I_i : intensitat de radiació incident [W/m^2]
- I_a : intensitat de radiació absorbida, $\alpha \cdot I_i$ [W/m^2]
- I_r : intensitat de radiació reflectida, $\rho \cdot I_i$ [W/m^2]
- I_t : intensitat de radiació transmesa, $\tau \cdot I_i$ [W/m^2]

Es defineixen doncs l'absortivitat (α), la reflectivitat (ρ) i la transmissivitat (τ), paràmetres que depenen de la longitud d'ona, com la fracció d'energia incident en un cos que és absorbida, reflectida o transmesa per aquest i es compleix:

$$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1 \quad (\text{A.20})$$

En funció del valor d'aquests paràmetres es poden classificar els cossos segons es mostra a la Taula A.1:

Taula A.1. Classificació dels cossos segons els paràmetres α , ρ i τ .

Cos negre	$\alpha(\lambda) = 1$	$\rho(\lambda) = 0$	$\tau(\lambda) = 0$
Mirall perfecte	$\alpha(\lambda) = 0$	$\rho(\lambda) = 1$	$\tau(\lambda) = 0$
Cos opac	$\alpha(\lambda) + \rho(\lambda) = 1$		$\tau(\lambda) = 0$
Cos transparent	$\alpha(\lambda) = 0$	$\rho(\lambda) = 0$	$\tau(\lambda) = 1$
Cos semitransparent	$\alpha(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$		$\rho(\lambda) = 0$
Cos gris	α independent de λ	$\alpha + \rho(\lambda) + \tau(\lambda) = 1$	



Es defineix un cos negre com aquell objecte o sistema que permet que tota la radiació incident que arriba a la seva superfície penetri en ell i l'absorbeixi internament, per a qualsevol longitud d'ona i qualsevol angle d'incidència de la radiació. Es pot definir doncs com un absorbidor perfecte. Segons la llei de Kirchhoff, els poders emissius i absorbents de tots els cossos a la mateixa temperatura són proporcionals, segons s'indica a continuació:

$$\frac{E_1}{A_1} = \frac{E_2}{A_2} = \dots = f(T) \quad (\text{A.21})$$

on: E_i : poder emissiu del cos i [W/m²]
 A_i : poder absorbent del cos i [W/m²]

Segons aquesta llei, si el cos es troba en equilibri termodinàmic, emet cap a l'exterior la mateixa quantitat d'energia que ha absorbit, seguint l'expressió:

$$\alpha(\lambda) = \varepsilon(\lambda) \quad (\text{A.22})$$

on: $\alpha(\lambda)$: absortivitat [-]
 $\varepsilon(\lambda)$: emissivitat [-]

En el cas concret del cos negre, la darrera expressió equival a la unitat i es pot afirmar que la radiació emesa per un cos negre a una certa temperatura és la radiació màxima possible que qualsevol cos a la mateixa temperatura pot emetre. És a dir, es tracta també d'un emissor perfecte. Per aquesta raó, el cos negre s'utilitza com a patró de comparació en l'estudi de la radiació emesa per cossos reals, els quals absorbeixen o emeten només una porció de l'energia que absorbeix o emet un cos ideal. El paràmetre que indica com radia un cos real en comparació amb un ideal a la mateixa temperatura és el que es coneix com emissivitat, que es correspon amb el quocient entre l'emissió real i la màxima emissió (cos negre) per una determinada longitud d'ona:

$$\varepsilon = \frac{I}{I_b} \quad (\text{A.23})$$

on: ε : emissivitat
 I : intensitat de radiació del cos real [W/m²]
 I_b : intensitat de radiació del cos negre [W/m²]



Per tal de calcular la radiació emesa per un cos qualsevol es disposa d'un seguit de lleis i equacions, que es descriuen breument a continuació:

- Llei de distribució de Planck: estableix la distribució de la radiació d'energia d'un cos negre per a diferents temperatures en funció de la longitud d'ona (λ), expressant-se aquesta intensitat de radiació emesa en termes de poder emissiu espectral mitjançant l'equació:

$$E_{\lambda} = \frac{C_1}{\lambda^5 \cdot \left[\exp\left(\frac{C_2}{\lambda \cdot T}\right) - 1 \right]} \quad (\text{A.24})$$

on:

$$C_1 = 2\pi H c^2 = 3,742 \cdot 10^{-16} \text{ W} \cdot \text{m}^2$$

$$C_2 = H c / K = 1,439 \cdot 10^{-2} \text{ m} \cdot \text{K}$$

H : constant de Planck, $6,626 \cdot 10^{-34} \text{ W} \cdot \text{s}^2$

c : velocitat de la llum en el buit, $3 \cdot 10^8 \text{ m/s}$

K : constant de Boltzmann, $1,38 \cdot 10^{-23} \text{ W} \cdot \text{s} \cdot \text{K}^{-1}$

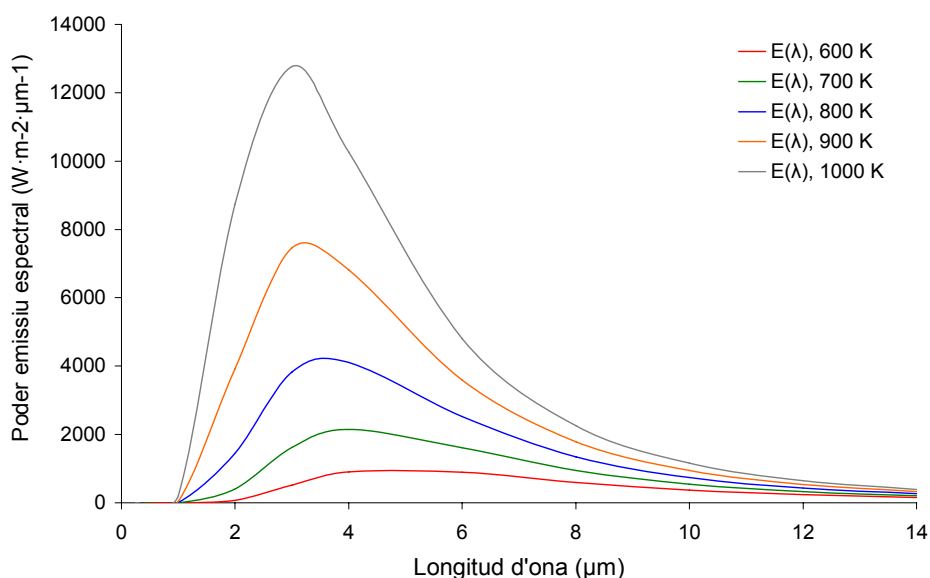


Fig. A.4. Llei de Planck.

Com es pot veure a la representació gràfica de la llei de Planck (Fig. A.4), el poder emissiu depèn tant de la longitud d'ona com de la temperatura, augmentant ràpidament a mesura que augmenta T . Es pot considerar gairebé nul per a longituds d'ona inferiors a $1 \mu\text{m}$ i a mesura que λ s'incrementa, el poder emissiu creix bruscament fins a arribar a un màxim que depèn de la temperatura, segons la llei del desplaçament de Wien.



- Llei del desplaçament de Wien: determina la longitud d'ona a la qual es produeix la màxima radiació d'energia per a una determinada temperatura, segons l'expressió:

$$\lambda_{max} = \frac{2897,6}{T} \quad (\text{A.25})$$

on: λ_{max} : longitud d'ona associada al poder emissiu màxim, per a cada T [μm]

T : temperatura del cos [K]

- Llei d'Stefan-Boltzmann: determina que la radiació emesa per un cos ideal o negre a una determinada temperatura és la màxima radiació que un cos pot emetre a la mateixa temperatura i que aquesta és directament proporcional a la quarta potència de T . Aquest poder emissiu es pot calcular mitjançant la integració de l'equació de Planck a tota la gamma de longituds d'ona de l'espectre i ve donada per la següent expressió:

$$E_b = \sigma \cdot T^4 \quad (\text{A.26})$$

on: σ : constant d'Stefan-Boltzmann, $5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$

Es pot expressar, doncs, la radiació total emesa per un cos real a una determinada temperatura, tal com segueix:

$$E = \varepsilon \cdot \sigma \cdot T^4 \quad (\text{A.27})$$

L'emissivitat ε és una propietat característica de la superfície emissora, és diferent per a cada longitud d'ona i depèn de factors com la temperatura o l'angle d'incidència de la radiació. Així, quan es calcula la radiació emesa per un cos real cal conèixer l'emissivitat total per a totes les direccions i longituds d'ona. Normalment, es calcula experimentalment en la direcció normal a la superfície i en funció de λ . No obstant, en alguns casos és necessari assumir una emissivitat (absortivitat) constant per a totes les longituds d'ona. Aquesta aproximació es relaciona amb el concepte de cos gris.



A.2. Conceptes generals d'instrumentació infraroja

La regió infraroja (IR) s'estén al llarg d'una àmplia secció de l'espectre electromagnètic, entre la del visible i les ones de ràdio, i correspon al rang de longituds d'ona que va de $0,78 \mu\text{m}$ a $10^3 \mu\text{m}$. Segons es veu a la Figura A.5, la regió infraroja s'acostuma a dividir en les següents subregions:

- IR proper (NIR): de $0,78 \mu\text{m}$ a $3 \mu\text{m}$.
- IR mitjà (MIR): de 3 a $6 \mu\text{m}$.
- IR llunyà o tèrmic (TIR): de 6 a $15 \mu\text{m}$.
- IR extrem: de 15 a $10^3 \mu\text{m}$.

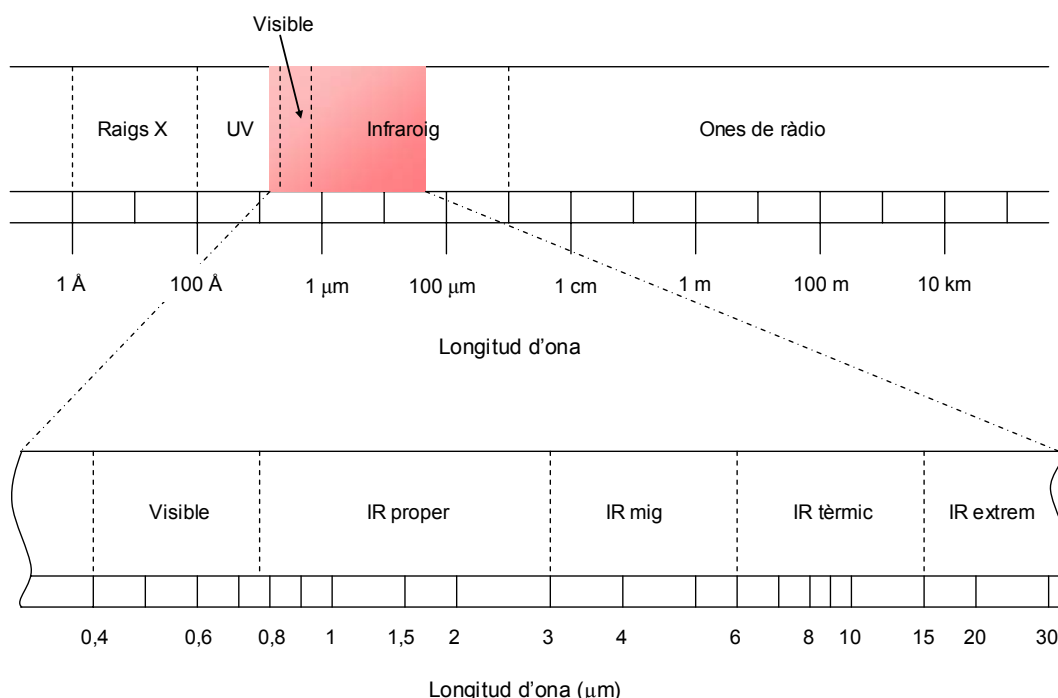


Fig. A.5. Rang de la radiació tèrmica dins l'espectre electromagnètic.

La radiació infraroja és molt semblant, en les seves propietats físiques, a la pròpia del visible. Pot ser detectada per una gran varietat de sensors IR (Vincent, 1990), que són aparells que subministren un senyal elèctric proporcional a la radiació infraroja que els arriba. De forma general, hi ha dues famílies principals de sensors que s'utilitzen en instrumentació IR:

- Sensors tèrmics (bolòmetres, termopiles, detectors piroelèctrics): capten la radiació de forma indirecta, mitjançant l'efecte tèrmic que aquesta provoca. Són sensibles en tot el rang espectral IR i operen a temperatura ambient.



- Sensors quàntics (fotodíodes o fotoconductors fets amb semiconductors): el seu funcionament es basa en l'efecte que produeixen directament els fotons que formen la llum. Tot i tenir un temps de resposta menys elevat que els anteriors, només operen en un rang espectral determinat, fet que requereix la utilització de diferents materials en funció de la banda espectral en què es treballa. A més, normalment requereixen refrigeració a temperatures criogèniques, per tal d'augmentar el seu nivell de detecció i minimitzar l'emissió pròpia del sensor. Aquestes baixes temperatures s'assoleixen amb diferents mètodes (Hudson, 1969; Gaussorgues, 1999).

Aquests dos sistemes de detecció permeten la captació de radiació infraroja, però des del punt de vista de l'usuari, la distinció principal entre els diferents sensors no es basa en el tipus de detector sinó en el mode d'operació. Es defineix el terme resolució d'un sensor com la capacitat d'aquest de discriminar la informació que rep (Estes i Simonett, 1975). Cal distingir entre:

- Resolució espacial: determina l'objecte més petit que pot ser discriminat en una imatge. En un sistema fotogràfic equival a la distància mínima per la que dos objectes apareixen separats i es mesura en mm.
- Resolució espectral: indica el nombre i l'amplada de les bandes espectrals que el sensor pot discriminar.
- Resolució radiomètrica: representa la sensibilitat del sensor, és a dir, la capacitat que té de detectar els canvis en la radiació espectral que rep.
- Resolució temporal: representa la cobertura freqüencial que proporciona el sensor.
- Resolució angular: indica la capacitat del sensor per a analitzar la mateixa zona des de diferents angles.

Bàsicament, les dues variables a tenir en compte són la resolució espectral i la resolució espacial, a partir de les quals es distingeixen 4 tipus diferents d'instrumentació IR, segons mostra la Taula A.2.

Taula A.2. Classificació de la instrumentació infraroja.

		Resolució espectral	
		NO	SI
Resolució espacial	NO	Radiòmetres	Espectròmetres infrarojos
	SI	Càmeres infraroges	Espectròmetres d'imatge



El cas més simple, aquell en què no es té resolució espectral i tampoc espacial, l'òptica només actua restringint el camp de visió de l'aparell a un cert angle sòlid i el resultat és una xifra. Aquesta configuració tan simple constitueix el funcionament bàsic d'un radiòmetre (termòmetre de radiació), que mesura el flux de calor radiant que es transmet a través d'una superfície. Altres instruments que funcionen de manera similar són els transductors de flux de calor, que mesuren la calor total, incloent la transferència per convecció i/o conducció.

En els instruments que tenen només resolució espectral s'integra la radiació incident al llarg de tot el camp de visió de l'instrument, però es discrimina entre les diferents longituds d'ona del rang espectral d'operació, de manera que el resultat és un espectre. Aquests instruments reben el nom d'espectròmetres infrarojos. Per tal de discriminar entre les diferents longituds d'ona és necessari l'ús d'un element òptic, per això també reben el nom de espectrofotòmetres. Quan un espectròmetre IR es calibra per a fer mesures de flux de radiació espectral rep el nom d'espectroradiòmetre.

Els instruments que ofereixen únicament resolució espacial integren la radiació incident al llarg de tot el rang espectral d'operació, però la discriminen entre els diferents punts del camp de visió, de forma que el resultat és una imatge. Aquests instruments s'anomenen càmeres infraroges.

D'altra banda, també existeixen instruments que combinen els dos tipus de resolució. Aquests s'anomenen espectròmetres d'imatge i la seva sortida, anomenada cub espectral, pot ser analitzada bé com una imatge per cada longitud d'ona del rang espectral, o bé com un espectre per cada punt del camp de visió de l'instrument.



A.3. Mesures quantitatives amb càmeres termogràfiques

Una de les característiques més importants de les càmeres de termografia infraroja en l'estudi d'incendis forestals és que, a part de donar valors qualitatius de foc –detecció dels punts d'ignició o visualització termogràfica de la seva propagació–, també proporcionen mesures quantitatives –temperatura o poders emissius de les flames–. La conversió de la radiació captada pel sensor a valors de temperatura ve donada pel model intern de transformació que posa en pràctica la càmera. Primerament, mitjançant el *model de sensor* es relaciona el número digital que proporciona la càmera amb la irradiació que arriba al sensor, que al mateix temps es relaciona amb el poder emissiu de les flames amb el *model radiomètric*. Finalment, a partir dels poders emissius es calcula la temperatura de les flames mitjançant un *model de temperatura* –model de major o menor complexitat en funció de les hipòtesis prèviament suposades–.

A.3.1. Model de sensor

El senyal e que prové del sensor, ja filtrat en un nivell anterior per qüestions de comoditat (vegeu la Figura 1.1), és amplificat electrònicament amb l'objectiu de donar-li el nivell suficient per a poder ser quantificat pel convertidor A/D. Aquesta amplificació es fa al sensor per a estimar així el rang màxim de radiació de l'escenari i el corresponent rang de sortida del detector. Els paràmetres de guany electrònic (gain) i compensació (offset) s'utilitzen per a proporcionar un rang complet de números digitals a la sortida del convertidor A/D, segons es mostra a la Figura A.6.

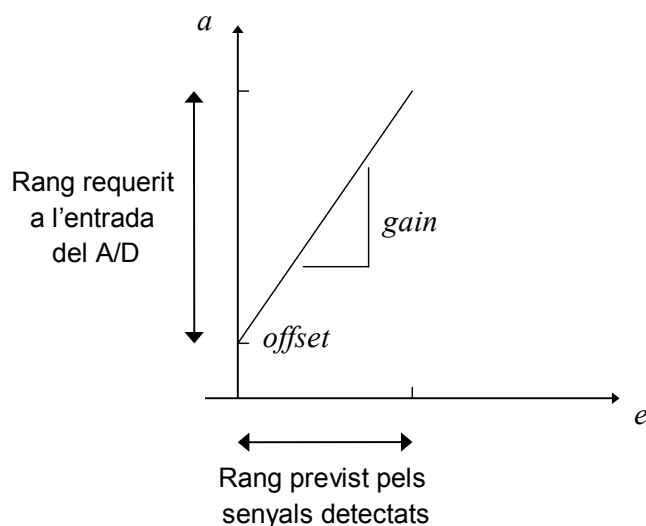


Fig. A.6. Relació entre el senyal amplificat, a , i el senyal de sortida del sensor, e .



Generalment, el paràmetre *gain* fa referència a la relació entre el senyal de sortida d'un sistema i el senyal d'entrada al mateix –es correspon amb el pendent de la recta representada al gràfic–, mentre que el paràmetre *offset* és un paràmetre de correcció per tal de treballar dins el rang especificat –es correspon amb l'ordenada a l'origen–. La resolució radiomètrica del sensor (vegeu l'Annex A.2) ve, en part, controlada pel guany electrònic. El senyal amplificat, a , ve donat per:

$$a = \text{gain} \cdot e(x, y) + \text{offset} \quad (\text{A.28})$$

Finalment, el senyal filtrat i amplificat és mostrejat i quantificat en números digitals, normalment mitjançant un quantificador lineal, segons es mostra a la Figura A.7. Matemàticament, això s'expressa mitjançant un operador ($\text{int}[\]$), que converteix el senyal de sortida de l'amplificador en el valor enter més proper. El número digital (DN) corresponent és:

$$DN = \text{int}[a] = \text{int}[\text{gain} \cdot e(x, y) + \text{offset}] \quad (\text{A.29})$$

El mostreig espacial-temporal que té lloc al convertidor A/D queda implícit a la darrera equació, en la conversió de coordenades espacials contínues a coordenades discretes. Tot i que l'operador $\text{int}[\]$ del convertidor dóna una relació no lineal entre DN i e , aquesta no linealitat pot ser ignorada en un rang mitjà-alt del senyal, ja que l'error de quantificació és un petit percentatge del senyal total. En canvi, per a números digitals baixos l'error de quantificació és més important i ha de ser considerat. El nombre de DN 's ve determinat per la resolució radiomètrica del sistema (Q), és a dir, el nombre de bits que s'utilitzen per a representar la senyal analògica. Així, el nombre de DN 's pot expressar-se com 2^Q .

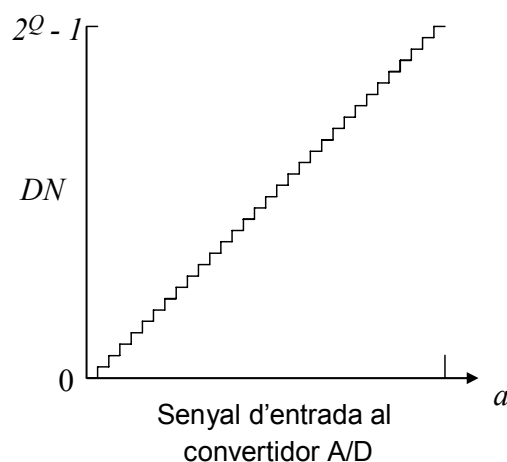


Fig. A.7. Relació entre el senyal amplificat que entra al convertidor, a , i el número digital de sortida, DN .



L'equació A.29 resulta bastant complexa perquè conté tres integracions, una respecte λ , (resposta espectral del sistema) i dos més respecte x i y (resposta espacial del sistema). Per això, normalment s'utilitza un *model de sensor simplificat*, on es considera una resposta espectral mitjana constant dins una banda espectral efectiva i una resposta espacial mitjana constant dins un camp de visió efectiu. Així, es pot escriure:

$$DN = \int \int \int K_S G_\lambda(x, y) d\lambda dx dy + offset \quad (A.30)$$

on: K_S : constant equivalent de la resposta del sensor

G_λ : irradiació espectral al sensor

D'aquesta manera, s'aconsegueix tenir una relació lineal entre la irradiació que arriba al sensor i el número digital de sortida d'aquest. Aquesta expressió pot simplificar-se encara més si es considera la irradiació al sensor ja integrada espectral i espacialment (G_S) en un cert píxel:

$$DN = K_S \cdot G_S + offset \quad (A.31)$$

En condicions normals d'operació, aquest *model de sensor simplificat* relaciona, segons un comportament lineal, la irradiació (G_S), que arriba al sensor de la càmera integrada en la banda espectral i el camp de visió efectius, amb el número digital que aquesta proporciona i que representa la imatge. Fer la inversa d'aquesta equació per a obtenir valors d'irradiació a partir dels números digitals és el que es coneix com *calibració del sensor (o de la càmera)*.

A.3.2. Model radiomètric de la càmera IR

Si es vol calcular la irradiació que arriba al sensor (G_S) així com determinar el poder emissiu (E) de l'objecte d'estudi, cal aplicar un nou model anomenat *model radiomètric*. Aquest pot arribar a ser molt complex i, per això, s'utilitzen diferents aproximacions en funció de les condicions experimentals. El paràmetre bàsic que cal prendre en consideració és la distància entre l'objecte o cos de mesura i la càmera termogràfica. Tanmateix, si aquesta distància és relativament petita i la càmera treballa en una finestra atmosfèrica, es pot suposar un medi totalment transparent ($\tau = 1$). Així, la intensitat de radiació que emet l'objecte (I_O) és idèntica a aquella que arriba al sensor (I_S). Llavors, en tant que la irradiació que arriba al sensor (G_S) és proporcional a I_O , el número digital (DN) que proporciona la



càmera pot expressar-se, segons l'equació A.31, com una funció lineal d' I_O . Si, a més, l'objecte que s'està mesurant es tracta com un cos negre, el poder emissiu es pot expressar en funció de la irradiació segons la forma següent:

$$G_s = K_G \cdot E_O \quad (\text{A.32})$$

on: K_G : constant de proporcionalitat relacionada amb el sistema òptic del sensor

E_O : poder emissiu del cos

Així, pot expressar-se també el número digital DN com a funció lineal d' E_O , segons:

$$DN = K_s \cdot K_G \cdot E_O + offset \quad (\text{A.33})$$

En canvi, quan la distància entre la càmera i l'objecte és gran, s'ha de tenir en compte que els efectes atmosfèrics no es poden negligir, fins i tot si es treballa a les finestres IR. En aquest cas, no només cal considerar una transmissivitat atmosfèrica no unitària sinó que, a més, apareixen nous termes de radiació a part de l'emesa per l'objecte (I_O) i l'emesa per l'ambient i reflectida per l'objecte. Així, també cal considerar la radiació emesa per l'atmosfera entre l'objecte i la càmera, i la radiació solar que es dispersa a l'atmosfera i després capta la càmera, tant aquella que és reflectida per l'objecte com aquella que no ho és. La importància relativa de tots aquests termes variarà en funció de les característiques específiques de la mesura; per exemple, en un incendi forestal en actiu, tots els termes seran negligibles enfront la radiació emesa per les flames.

A.3.3. Model de temperatura de la càmera IR

Com s'ha comentat, a partir de les imatges IR de les flames s'obtenen mesures de poders emissius o radiació que poden transformar-se en valors de temperatura mitjançant la conversió adequada. Segons les condicions d'operació, es poden considerar certes hipòtesis de treball que donen lloc a diferents models de temperatura:

- *Model d'ordre zero.* Se suposa que l'objecte d'estudi és un cos negre ($\varepsilon = 1$) i es negligeixen els efectes atmosfèrics del medi ($\tau = 1$), de manera que aplicant la llei d'Stefan-Boltzmann (eq. A.26) i substituint-ho a l'equació A.33, s'obté una expressió que relaciona directament el número digital DN que proporciona la càmera amb la temperatura, segons:



$$DN = K_S \cdot K_G \cdot \sigma \cdot T_0^4 + offset \quad (A.34)$$

on: σ : constant d'Stefan-Boltzmann, $5,67 \cdot 10^{-8} [\text{W} \cdot \text{m}^{-2} \cdot \text{K}^{-4}]$

T_0 : temperatura del cos negre [K]

Per a uns certs valors (arbitraris) dels paràmetres K_D , K_G i $offset$, la relació entre T_0 i DN pot apreciar-se a la Figura A.8. S'observa que un mateix interval de temperatura (ΔT) dóna variacions de número digital (ΔDN) més grans, com més alta és la temperatura; de fet, es compleix $(\Delta DN/DN) = 4 \cdot (\Delta T/T)$.

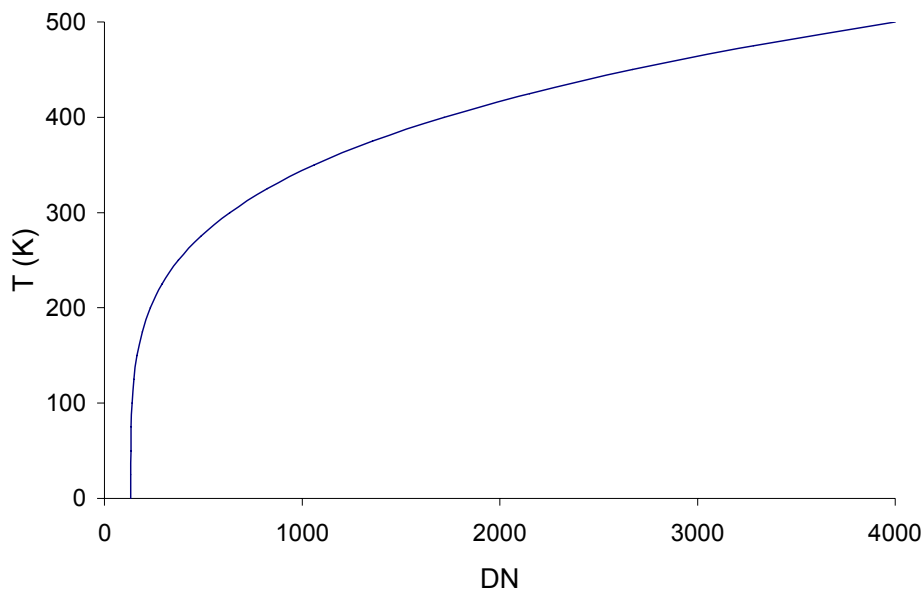


Fig. A.8. Relació entre DN i T en el model d'ordre zero (per $K_D \cdot K_G = 1,091$ i $offset = 133,33$).

Es pot constatar que en les darreres equacions s'ha negligit la dependència espectral, no obstant, les càmeres termogràfiques només són sensibles en un cert rang espectral. Per això, enlloc d'expressar el poder emissiu utilitzant la llei d'Stefan-Boltzmann, caldria calcular-lo integrant la llei de Planck (eq. A.24) en el rang espectral de longituds d'ona específic de la càmera. D'aquesta manera, es té:

$$DN = \int_{\Delta\lambda} [K_G \cdot K_S(\lambda) \cdot E_B(T_0, \lambda) + offset(\lambda)] d\lambda \quad (A.35)$$

on: $E_B(T_0, \lambda)$: poder emissiu espectral d'un cos negre a la temperatura T_0



Per a poder fer la inversa d'aquesta equació, normalment es fa una aproximació de la integral d' $E_B(T_0, \lambda)$ en el rang espectral $\Delta\lambda$ de la càmera. Aquesta aproximació ve representada per la funció invertible $F(T)$, anomenada funció de calibració.

$$DN = gain \cdot F(T_0) + offset \quad (A.36)$$

Si la funció de calibració és coneguda, els paràmetres *gain* i *offset* es poden determinar fàcilment a partir de mesures conegudes de temperatura de cossos negres, en un procés de calibració de la càmera. Un cop calibrat l'instrument, l'equació A.36 serveix per a obtenir, per a qualsevol cos, el que s'anomena la seva temperatura aparent de brillantor, on el terme aparent indica que no s'han fet correccions atmosfèriques ($\tau = 1$) i el terme brillantor que s'ha suposat un cos negre ($\varepsilon = 1$).

- *Model de primer ordre.* Es considera l'objecte d'estudi com un cos opac gris ($\rho = 1 - \varepsilon$), de manera que la radiació que emet l'objecte és deguda a la seva pròpia emissió però també a aquella emesa per l'ambient i reflectida pel cos. Per altra banda, es continuen negligint els efectes atmosfèrics del medi ($\tau = 1$); aquesta hipòtesi és correcta per a distàncies curtes entre l'objecte i la càmera. En aquest cas, s'expressa el poder emissiu del cos com:

$$E_0 = \varepsilon \sigma T_0^4 + (1 - \varepsilon) \sigma T_a^4 \quad (A.37)$$

on: T_a : temperatura de l'ambient [K]

Així, el número digital DN que proporciona la càmera es pot expressar tal i com s'indica:

$$DN = K_D \cdot K_G \cdot \sigma \cdot [\varepsilon T_0^4 + (1 - \varepsilon) T_a^4] + offset \quad (A.38)$$

Per a una temperatura $T_a = 300$ K, uns certs valors (arbitraris) dels paràmetres K_D , K_G i *offset* i dos valors d' ε , la relació entre T i DN pot apreciar-se a la Figura A.9. S'observa que, evidentment, per $\varepsilon = 1$ aquest model de primer ordre es transforma en el model d'ordre zero. Igual que en aquest, si es considera el rang espectral específic de la càmera termogràfica, es poden obtenir expressions similars a les equacions A.35 i A.36, per al cas d'ordre 1 (cos opac gris). Les temperatures obtingudes amb aquest model reben el nom de temperatures aparents, doncs no han sofert correccions atmosfèriques.



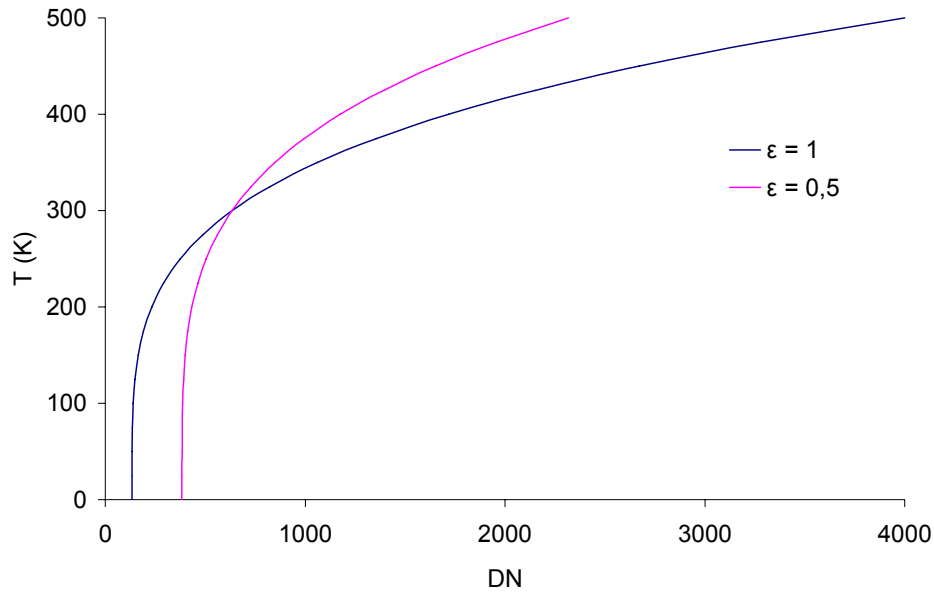


Fig. A.9. Relació entre DN i T per a dos emissivitats de l'objecte diferents, en el model de primer ordre.
(per $K_D \cdot K_G = 1,091$ i $\text{offset} = 133,33$)

En el cas particular de la càmera termogràfica utilitzada en l'experimentació (AGEMA Thermovision 570-Pro), el model intern que aquesta posa en pràctica per tal de convertir el DN associat a cada píxel de la imatge (*imgPixel*) a un valor de temperatura, és més complex que els models d'ordre zero i primer ordre descrits anteriorment, ja que aquest és vàlid per a totes les condicions d'operació i no realitza cap hipòtesi d'emissivitat o transmissivitat unitàries. Els passos que segueix la càmera per tal de fer aquesta transformació són (totes les equacions han estat extretes del manual d'instruccions de la càmera termogràfica *Toolkit IC2 Dig 16 Developers Guide 1.00 AGEMA 550/570*):

1. Conversió dels valors dels píxels de la imatge en valors de píxel lineals i compensats amb la temperatura interna de la càmera (*absPixel*, valor absolut del píxel), segons la següent fórmula:

$$\text{absPixel}(\text{imgPixel}) = \text{globalGain} \cdot \text{Lfunc}(\text{imgPixel}) + \text{globalOffset} \quad (\text{A.39})$$

$$\text{Lfunc}(p) = \frac{p - \text{Obas}}{1 - L \cdot (p - \text{Obas})} \quad (\text{A.40})$$

on: *globalGain* i *globalOffset*: paràmetres de guany i compensació

Obas: paràmetre de compensació considerat en la conversió lineal

L: constant de linealitat i calibració



2. Càlcul dels paràmetres següents:

$$tatmC = atmTemp - 273,15 \quad (A.41)$$

$$H_2O = relHum \cdot e^{(1,5587 + 6,939 \cdot 10^{-2} \cdot tatmC - 2,7816 \cdot 10^{-4} \cdot tatmC^2 + 6,8455 \cdot 10^{-7} \cdot tatmC^3)} \quad (A.42)$$

$$\tau = X \cdot e^{[-\sqrt{objectDistance} \cdot (\alpha_1 + \beta_1 \cdot \sqrt{H_2O})]} + (1 - X) \cdot e^{[-\sqrt{objectDistance} \cdot (\alpha_2 + \beta_2 \cdot \sqrt{H_2O})]} \quad (A.43)$$

$$K1 = \frac{I}{emissivity \cdot \tau} \quad (A.44)$$

$$K2 = \left[\frac{1 - emissivity}{emissivity} \cdot \frac{R}{\left(\frac{B}{e^{ambTemp}} - F \right)} + \frac{1 - \tau}{emissivity \cdot \tau} \cdot \frac{R}{\left(\frac{B}{e^{ambTemp}} - F \right)} \right] \quad (A.45)$$

on: *atmTemp*: temperatura atmosfèrica [K]

relHum: humitat atmosfèrica relativa (0,0-0,99)

X: factor d'escala

objectDistance: distància entre la càmera i l'objecte [m]

alpha1: atenuació de l'atmosfera sense vapor d'aigua

beta1: atenuació del vapor d'aigua

alpha2: atenuació de l'atmosfera sense vapor d'aigua

beta2: atenuació del vapor d'aigua

emissivity: emissivitat de l'objecte (0,01-1,0)

R, B, F: constants de calibració

ambTemp: temperatura ambient [K]

3. Càlcul del *objectSignal* (senyal corresponent a l'objecte que equival a un valor aproximadament proporcional a la quantitat de radiació captada pel sensor de la càmera). Es calcula tal i com s'indica:

$$objectSignal(absPixel) = \frac{K1}{2} \cdot absPixel - K2 \quad (A.46)$$



4. Càlcul de la temperatura [K] mitjançant la següent fórmula:

$$objectTemp(objectSignal) = \frac{B}{\ln\left(\frac{R}{objectSignal} + F\right)} \quad (A.47)$$





B. Resultats obtinguts en les proves experimentals

B.1. Resultats de la Prova 1 (300106_1)

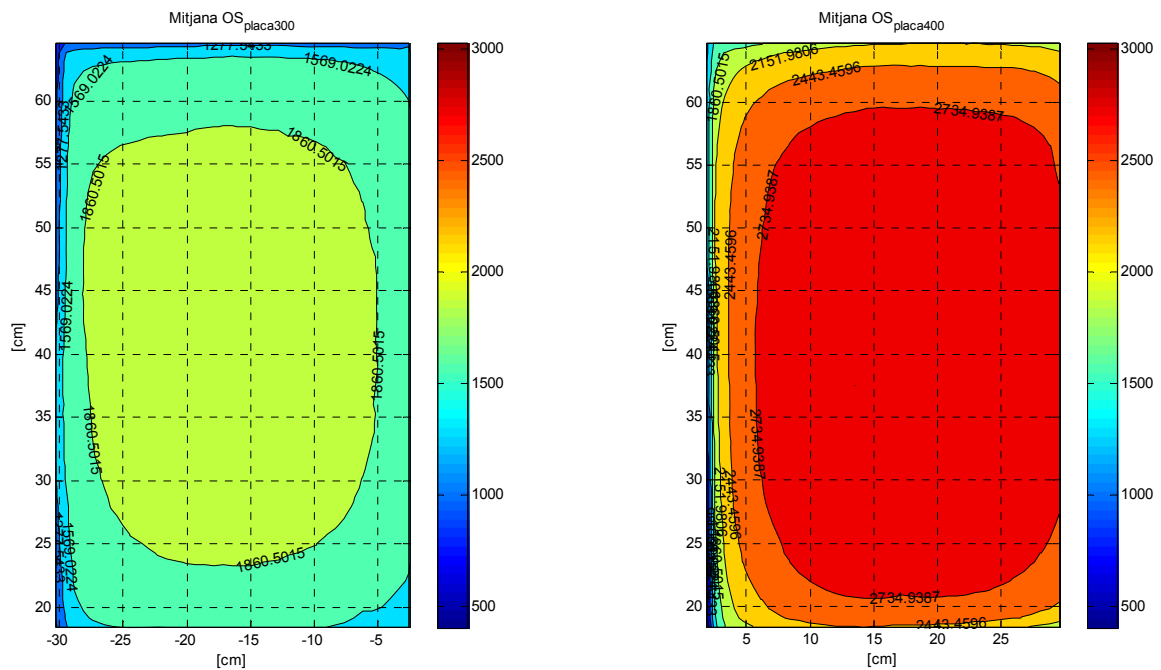


Fig. B.1. Prova1 – Matrius mitjanes de senyal per a les dues plaques sense flama al davant.

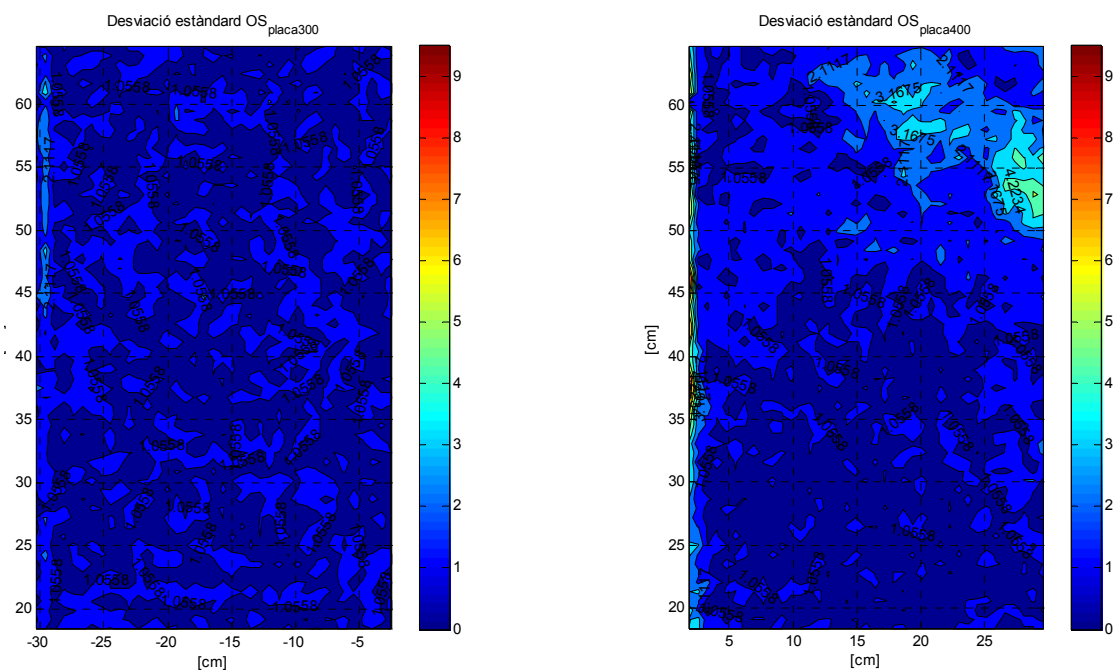


Fig. B.2. Prova1 – Desviacions estàndards de les plaques sense flama al davant.



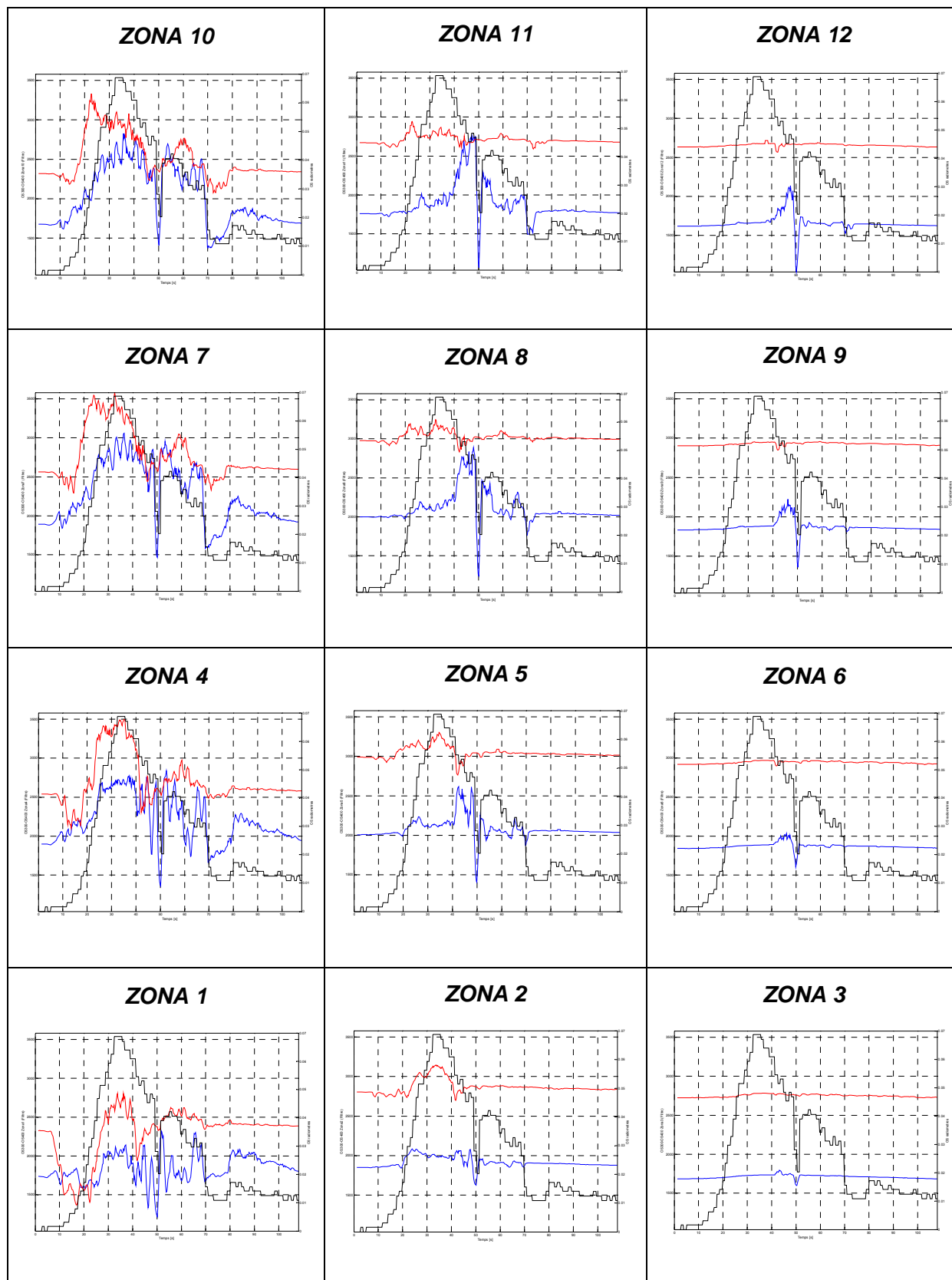


Figura B.3. Prova1 – Evolució respecte el temps dels valors de senyal OS_{300} , OS_{400} i flux dels radiòmetres a cada zona d'estudi especificada.



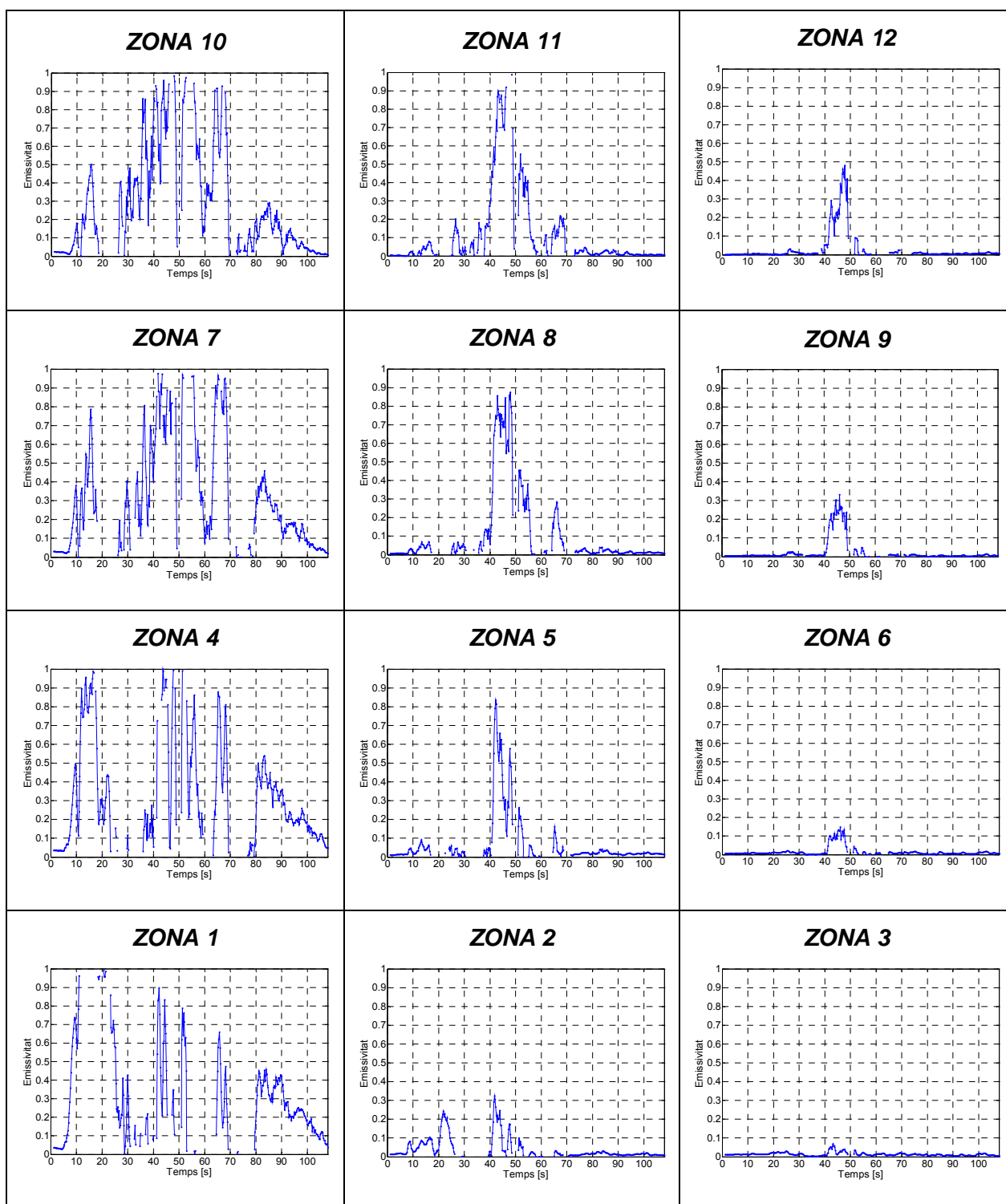


Figura B.4. Prova1 – Evolució de l'emissivitat respecte el temps a cada zona d'estudi especificada.



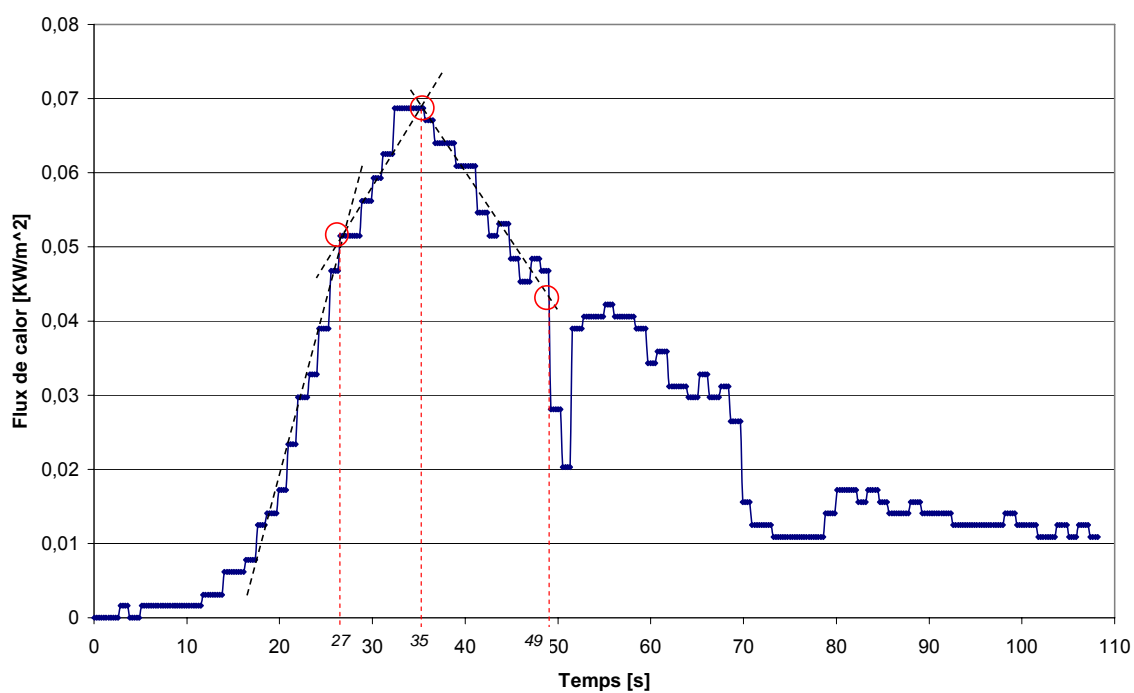


Figura B.5. Prova1 – Gràfic temporal del flux de calor. Càlcul de les diferents fases de la flama.

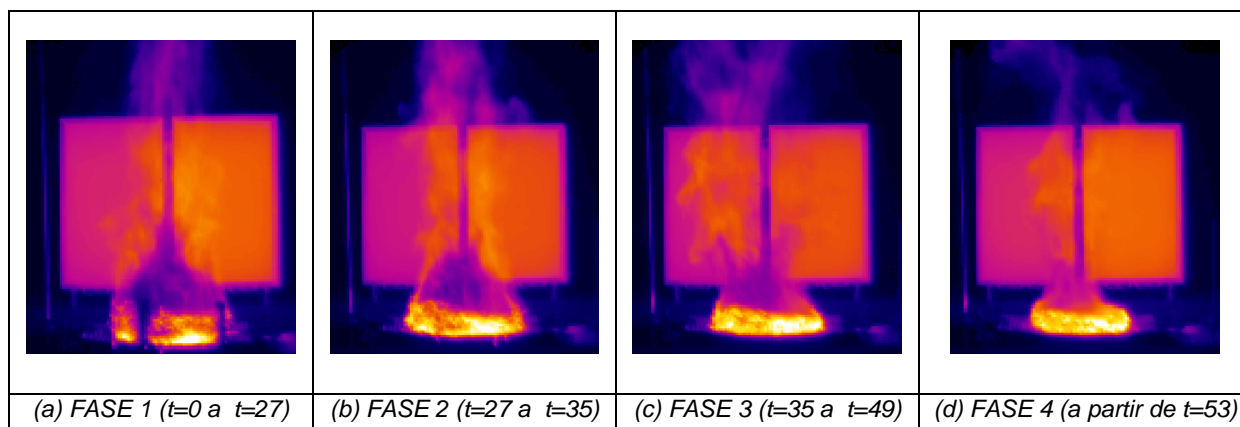


Figura B.6. Prova1 – Imatges termogràfiques representatives de cadascuna de les fases de la flama.



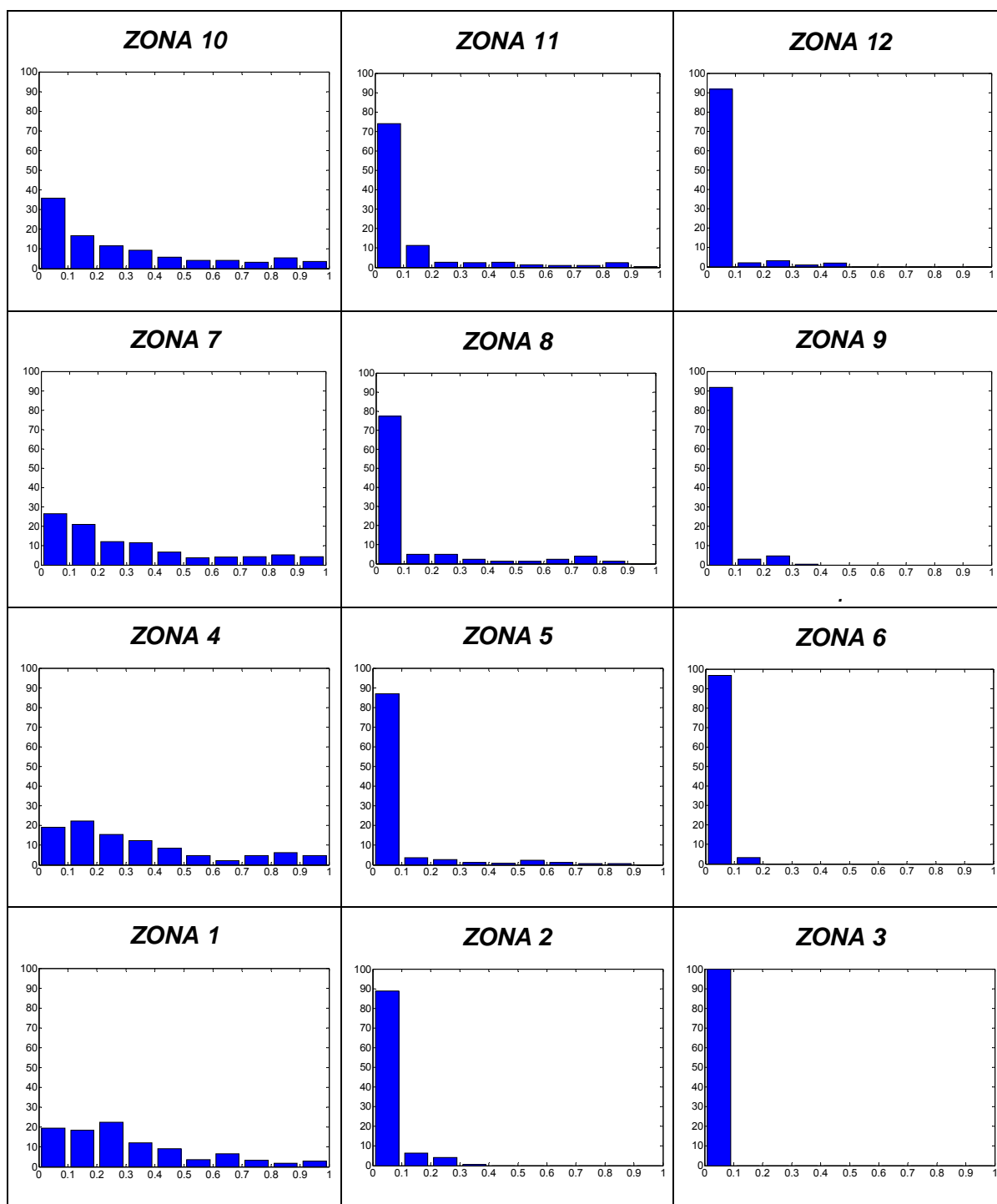


Figura B.7. Prova1 – Histogrames de les emissivitats durant tota la seqüència a cada zona d'estudi.



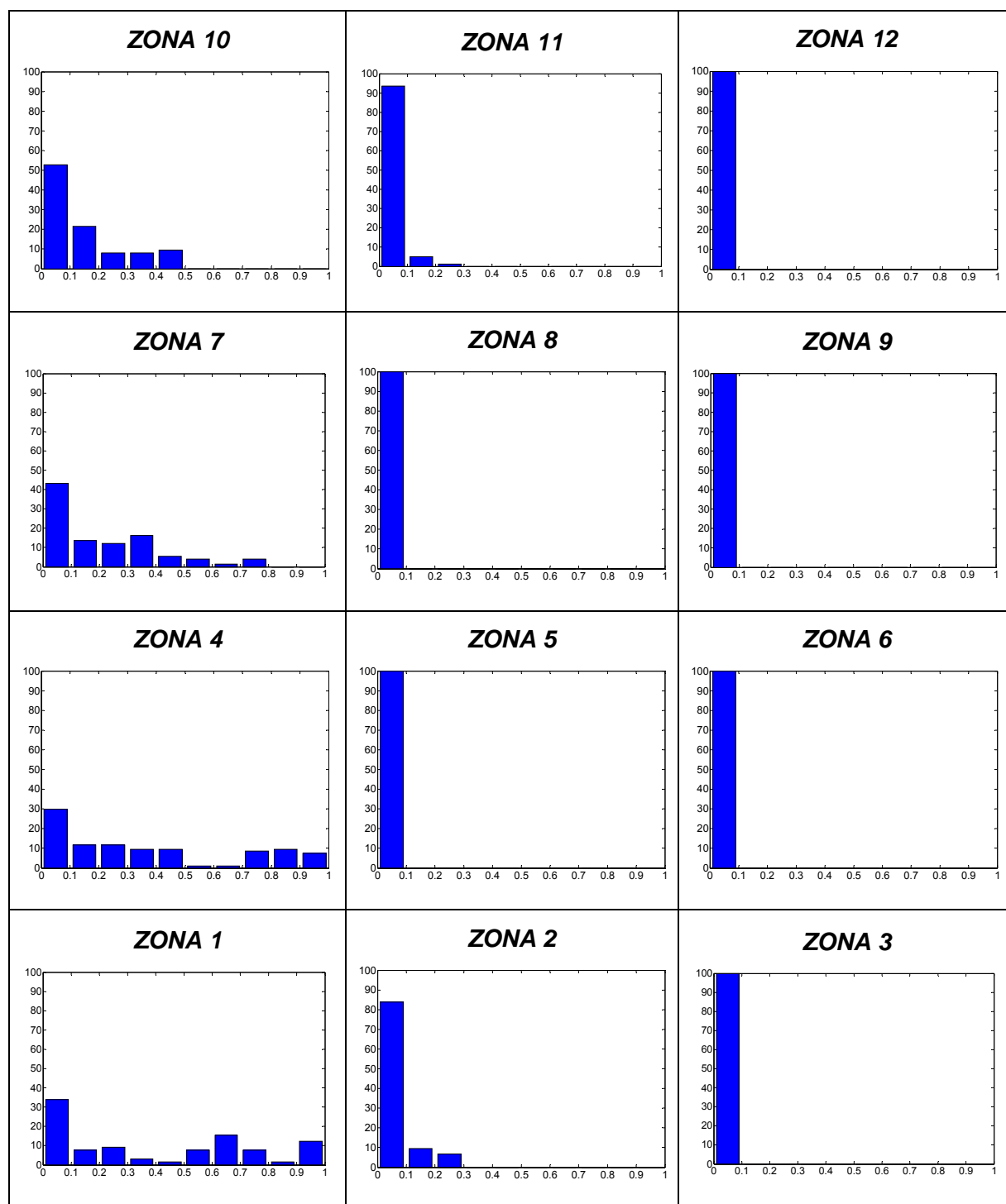


Figura B.8. Prova1 – Histogrames de les emissivitats corresponents a la Fase 1 de la flama a cada zona d'estudi.



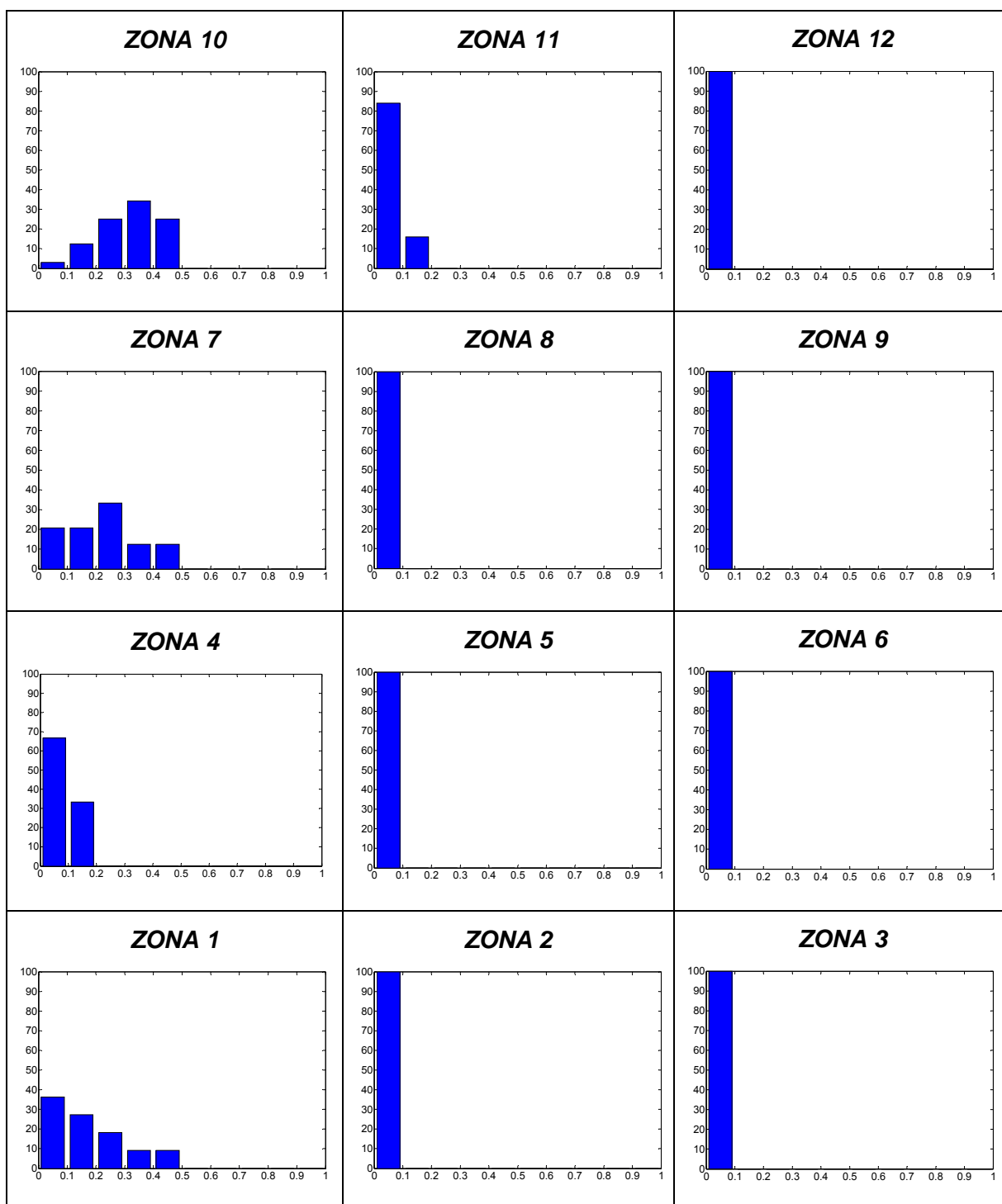


Figura B.9. Prova1 – Histogrames de les emissivitats corresponents a la Fase 2 de la flama a cada zona d'estudi.



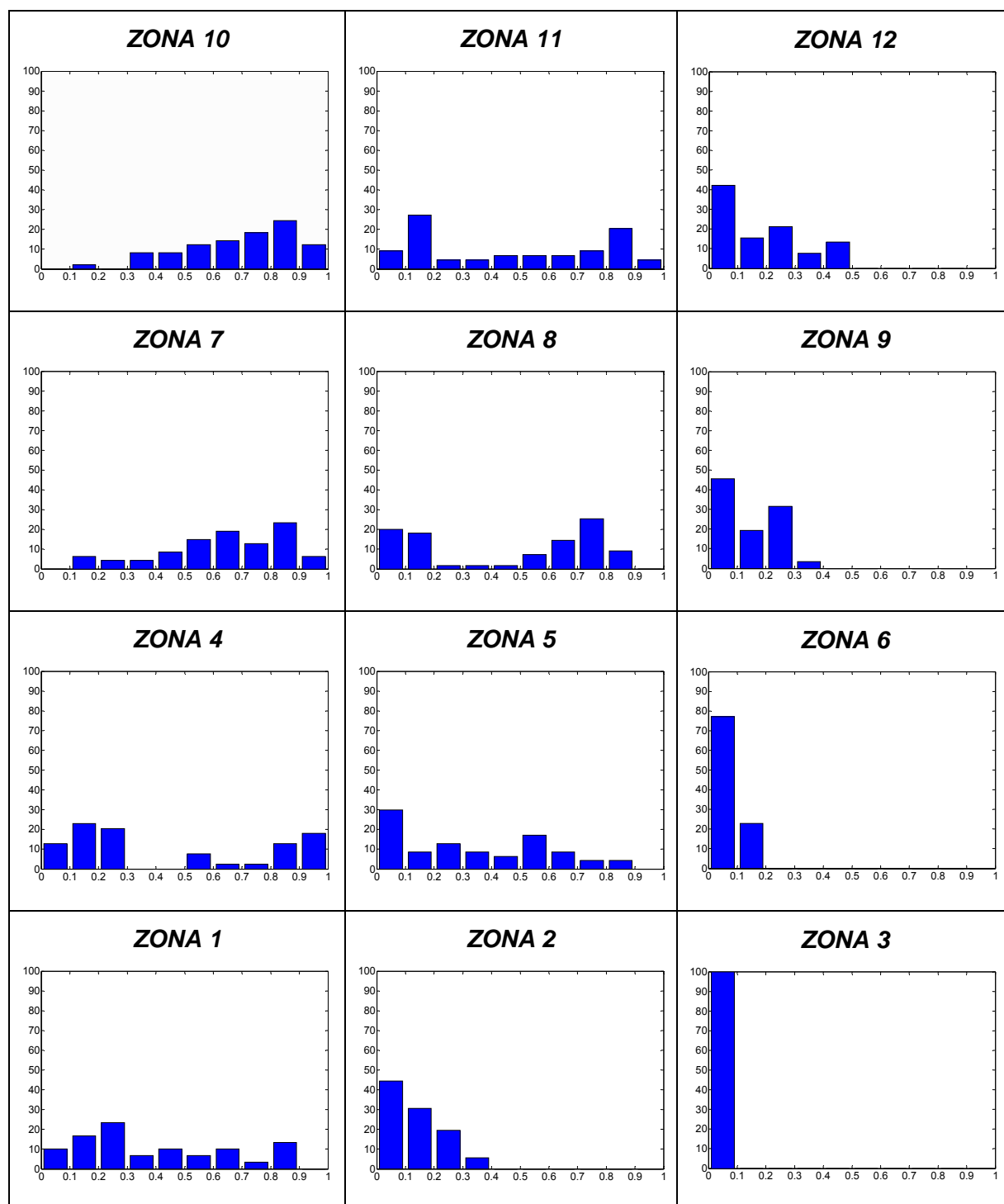


Figura B.10. Prova1 – Histogrames de les emissivitats corresponents a la Fase 3 de la flama a cada zona d'estudi.



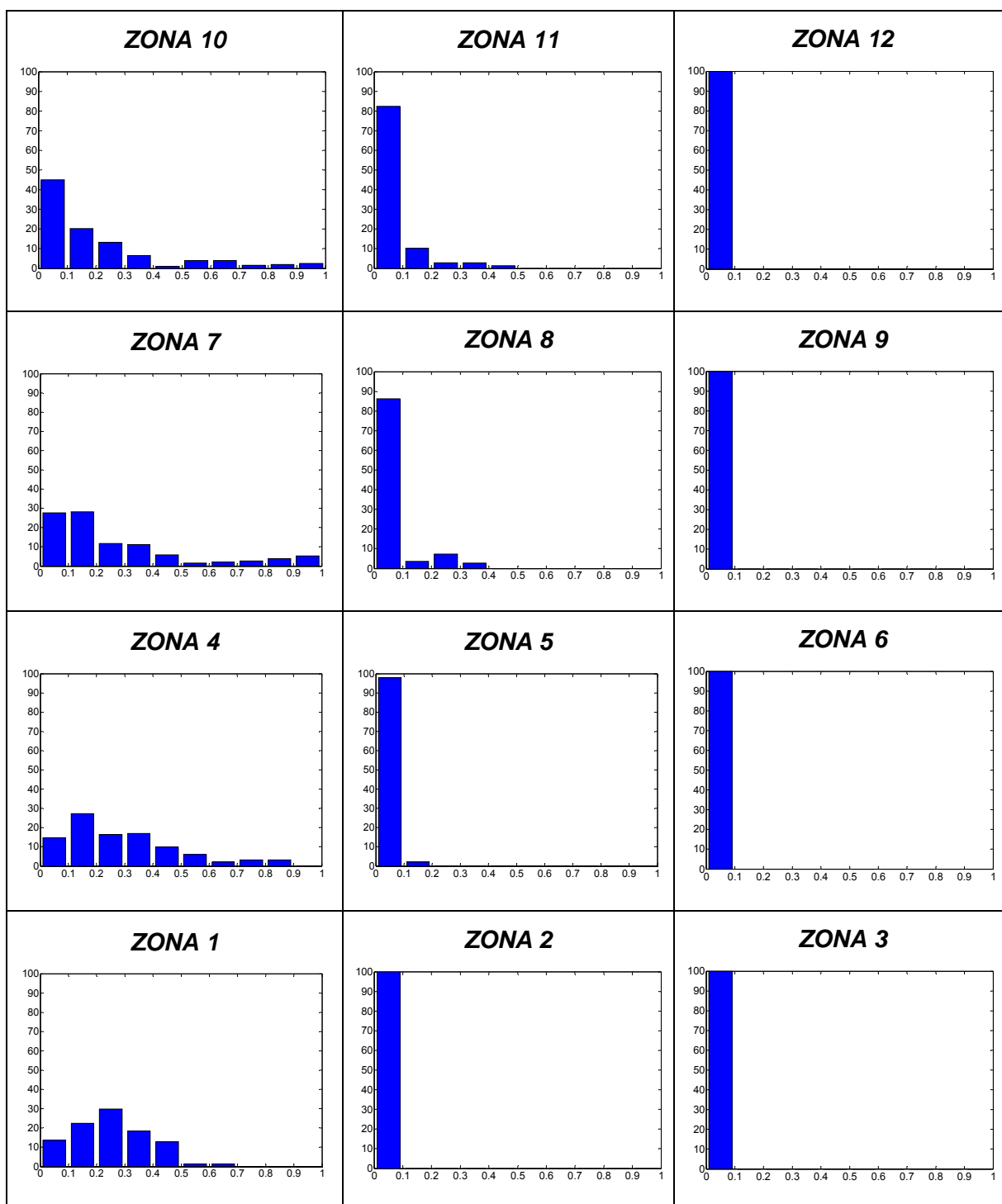


Figura B.11. Prova1 – Histogrames de les emissivitats corresponents a la Fase 4 de la flama a cada zona d'estudi.



B.2. Resultats de la Prova 2 (010206_1)

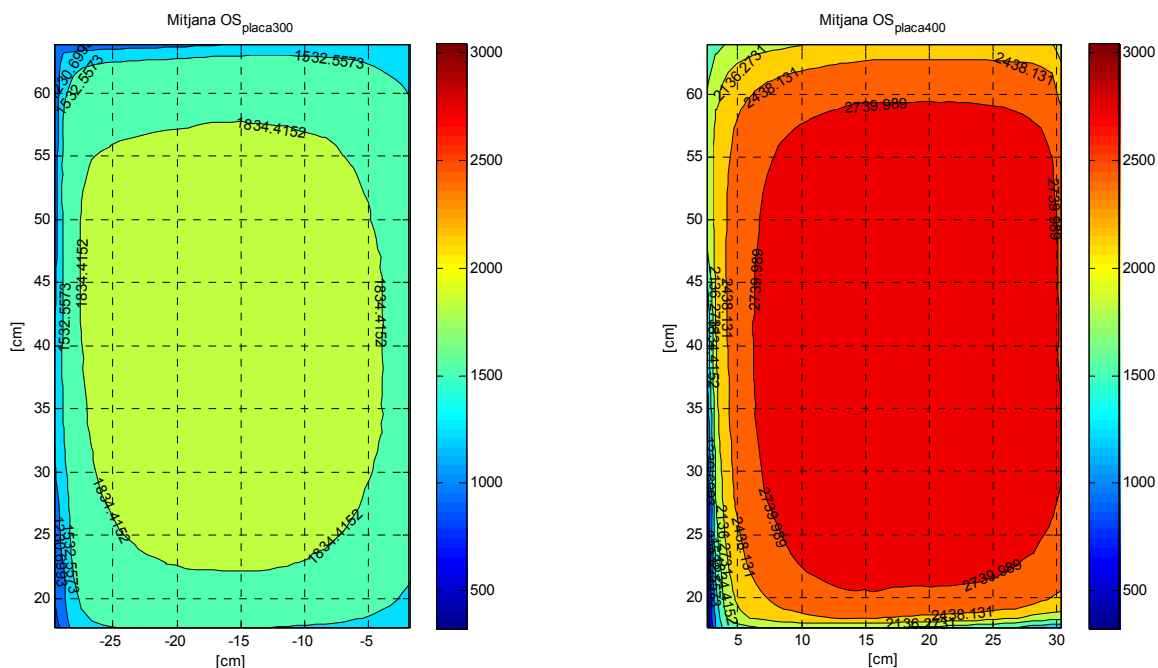


Fig. B.12. Prova2 – Matrius mitjanes de senyal per a les dues plaques sense flama al davant.

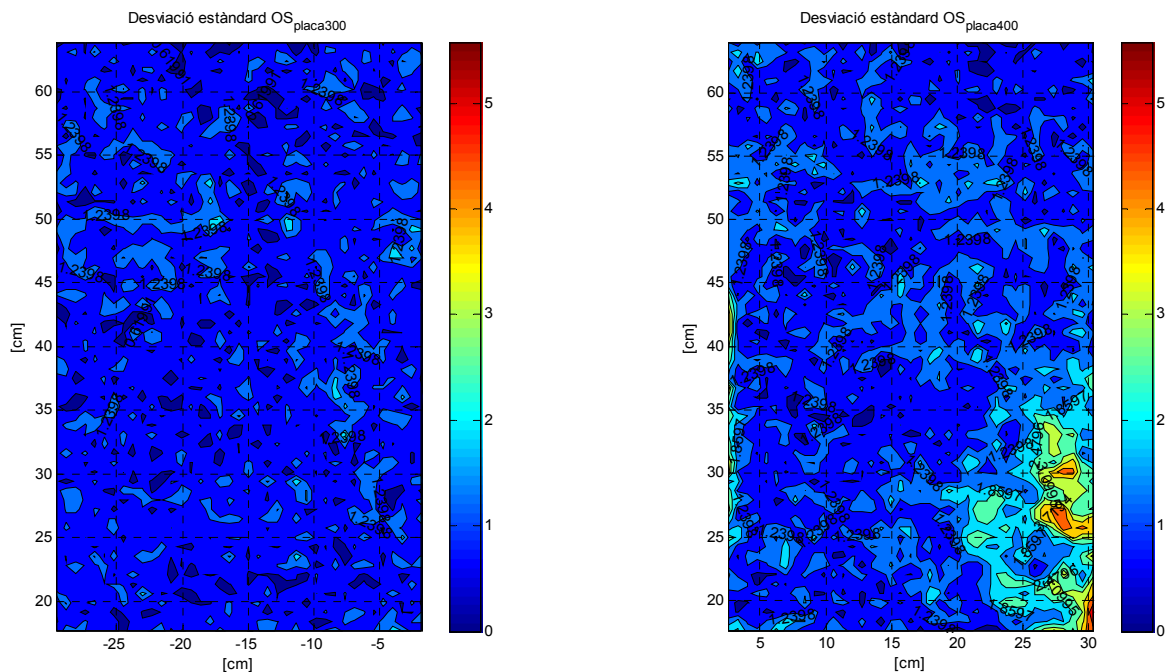


Fig. B.13. Prova2 – Desviacions estàndards de les plaques sense flama al davant.



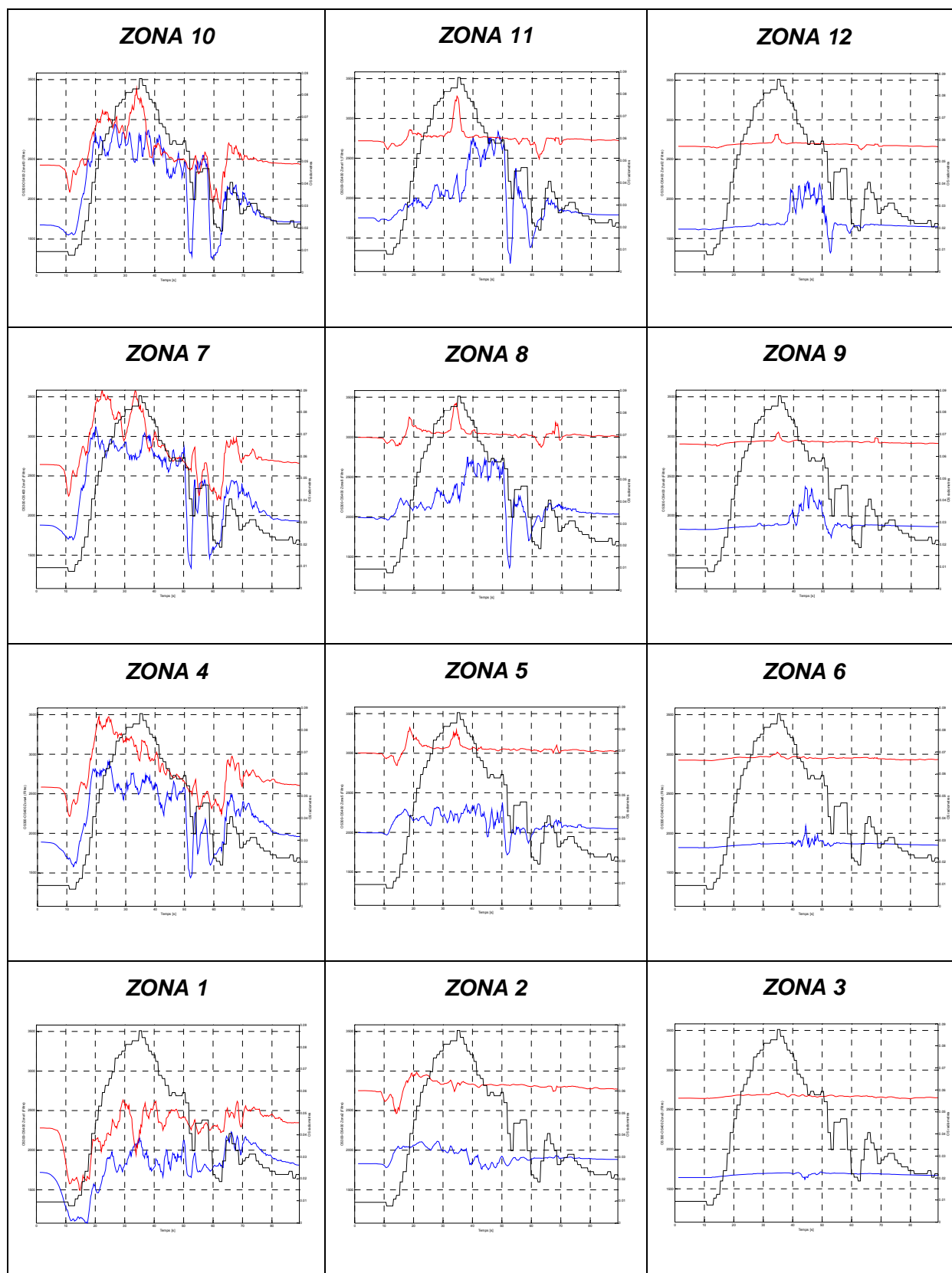


Figura B.14. Prova2 – Evolució respecte el temps dels valors de senyal OS_{300} , OS_{400} i flux dels radiòmetres a cada zona d'estudi especificada.



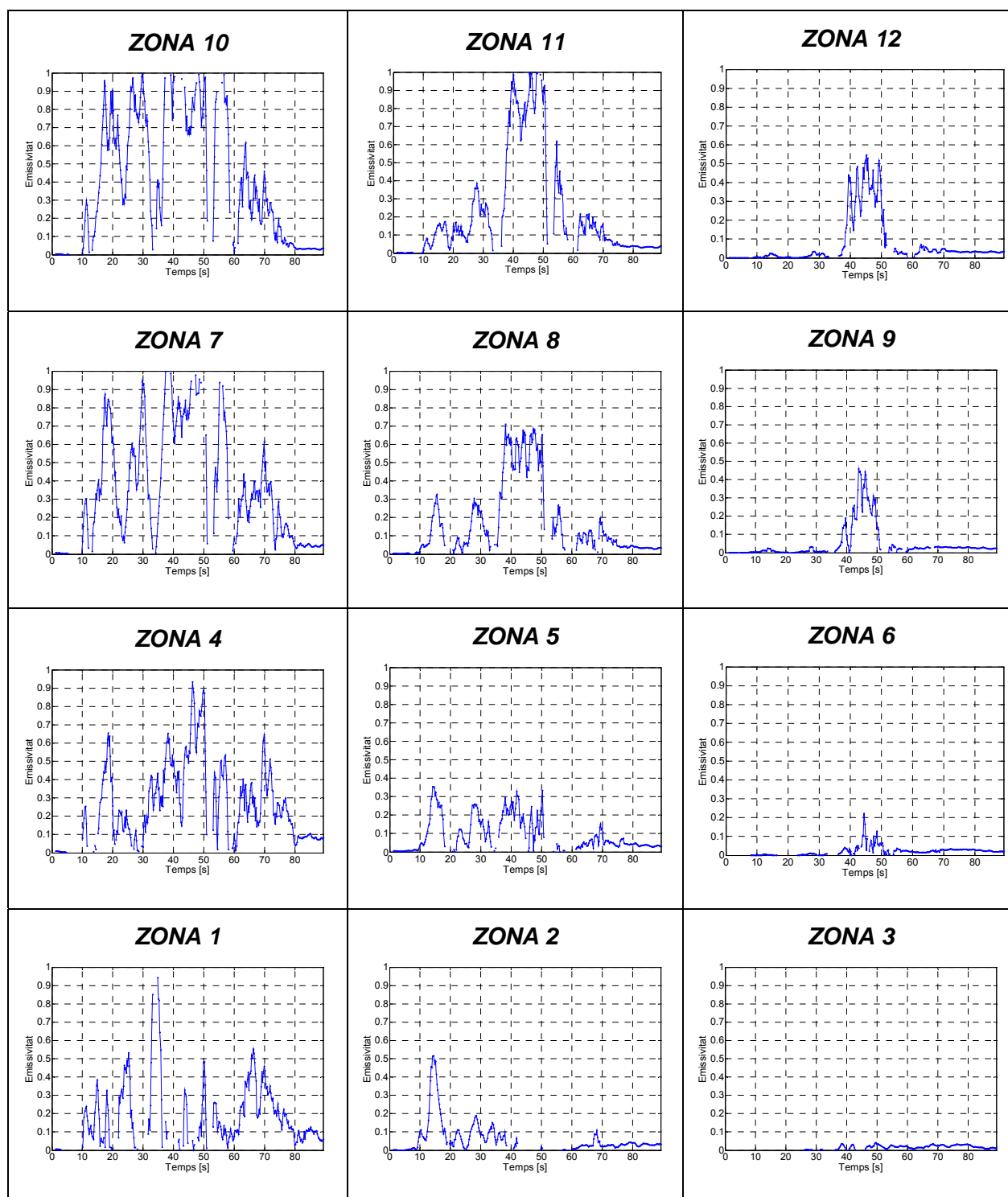


Figura B.15. Prova2 – Evolució de l'emissivitat respecte el temps a cada zona d'estudi especificada.



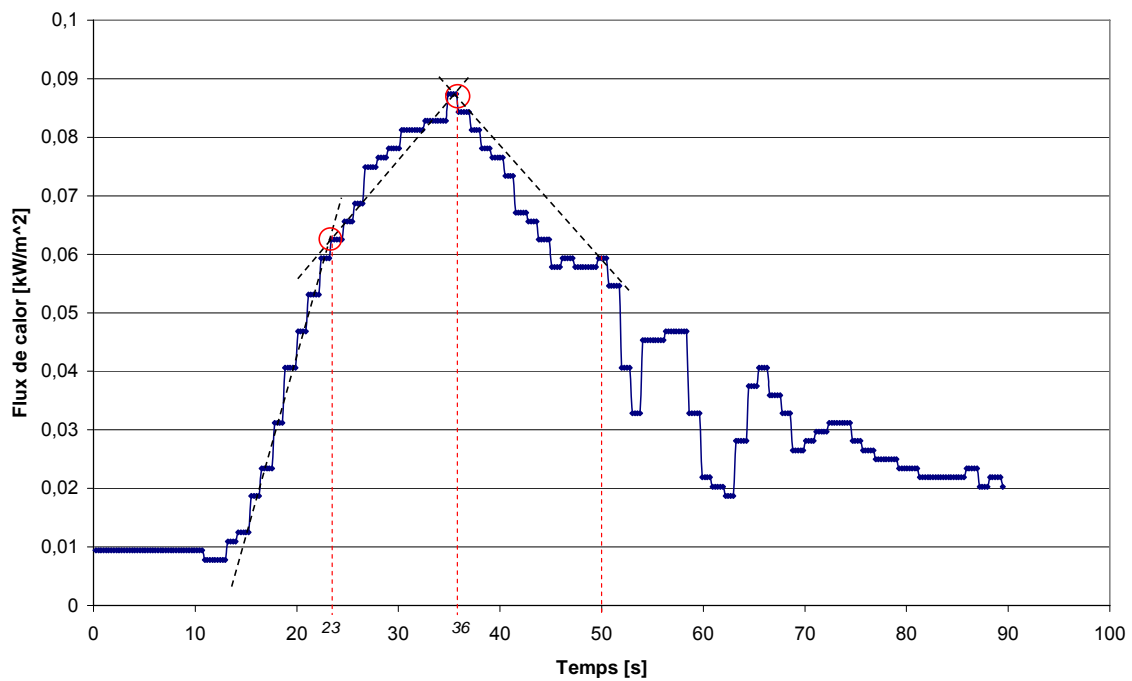


Figura B.16. Prova2 – Gràfic temporal del flux de calor. Càlcul de les diferents fases de la flama.

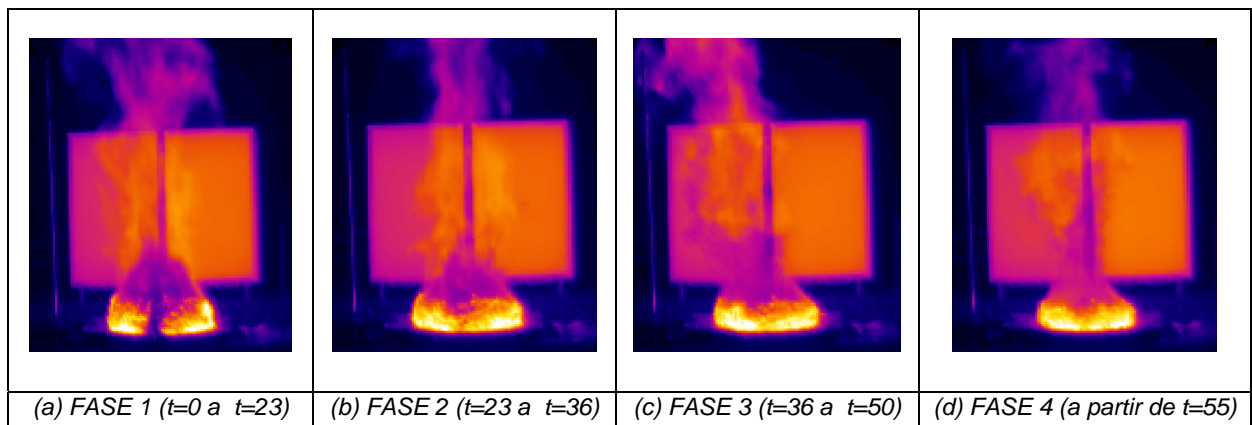


Figura B.17. Prova2 – Imatges termogràfiques representatives de cadascuna de les fases de la flama.



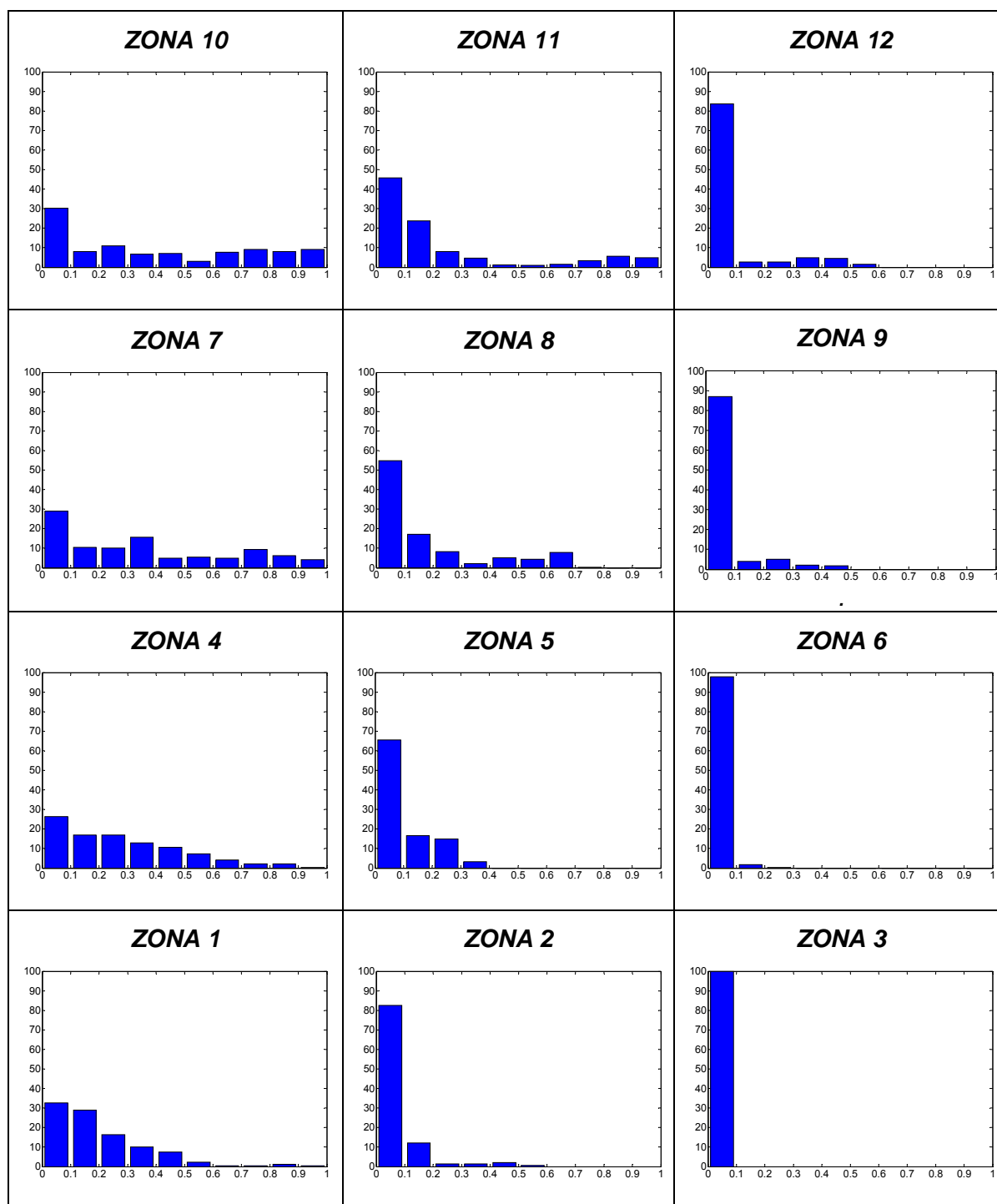


Figura B.18. Prova2 – Histogrames de les emissivitats durant tota la seqüència a cada zona d'estudi.



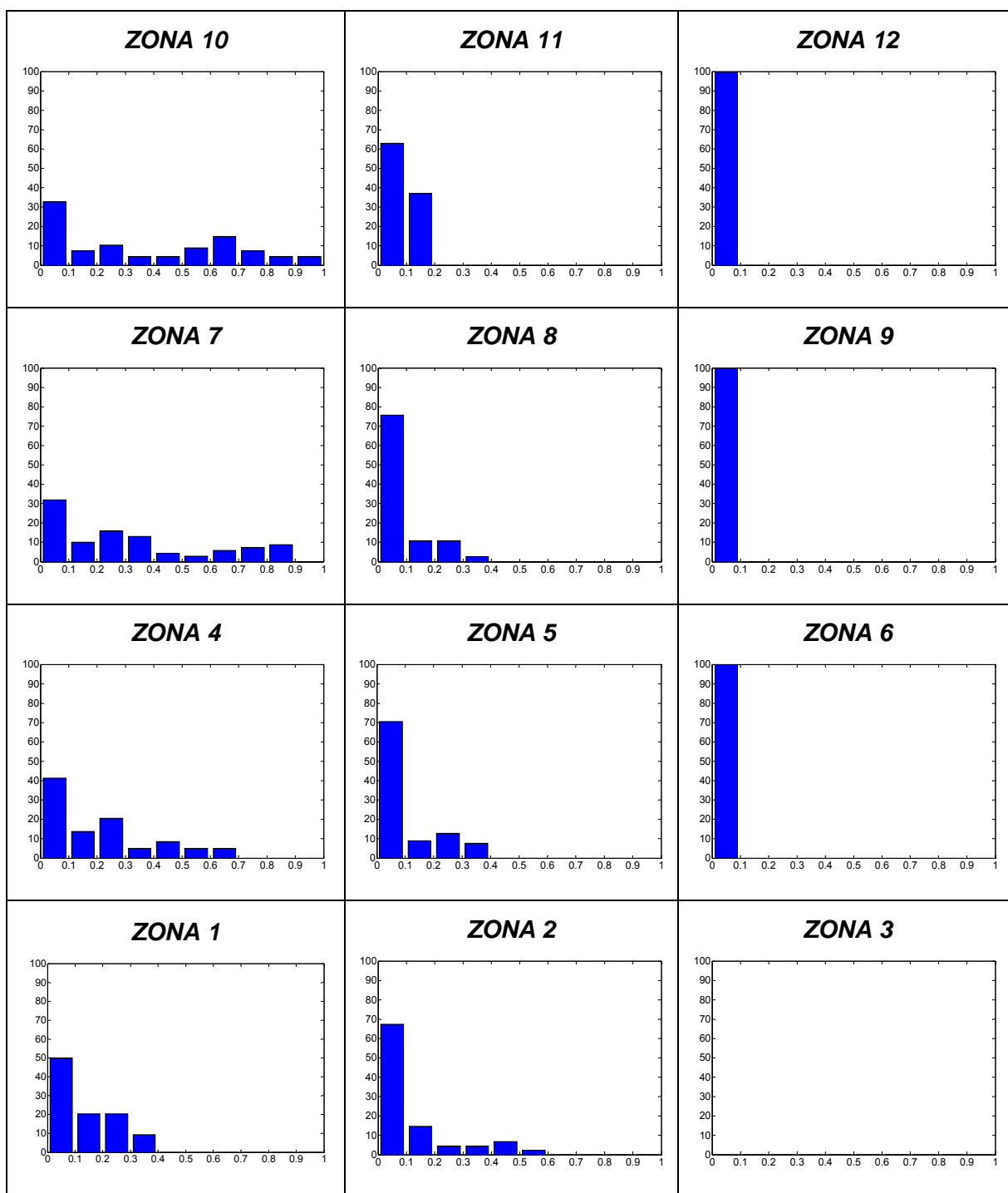


Figura B.19. Prova2 – Histogrames de les emissivitats corresponents a la Fase 1 de la flama a cada zona d'estudi.



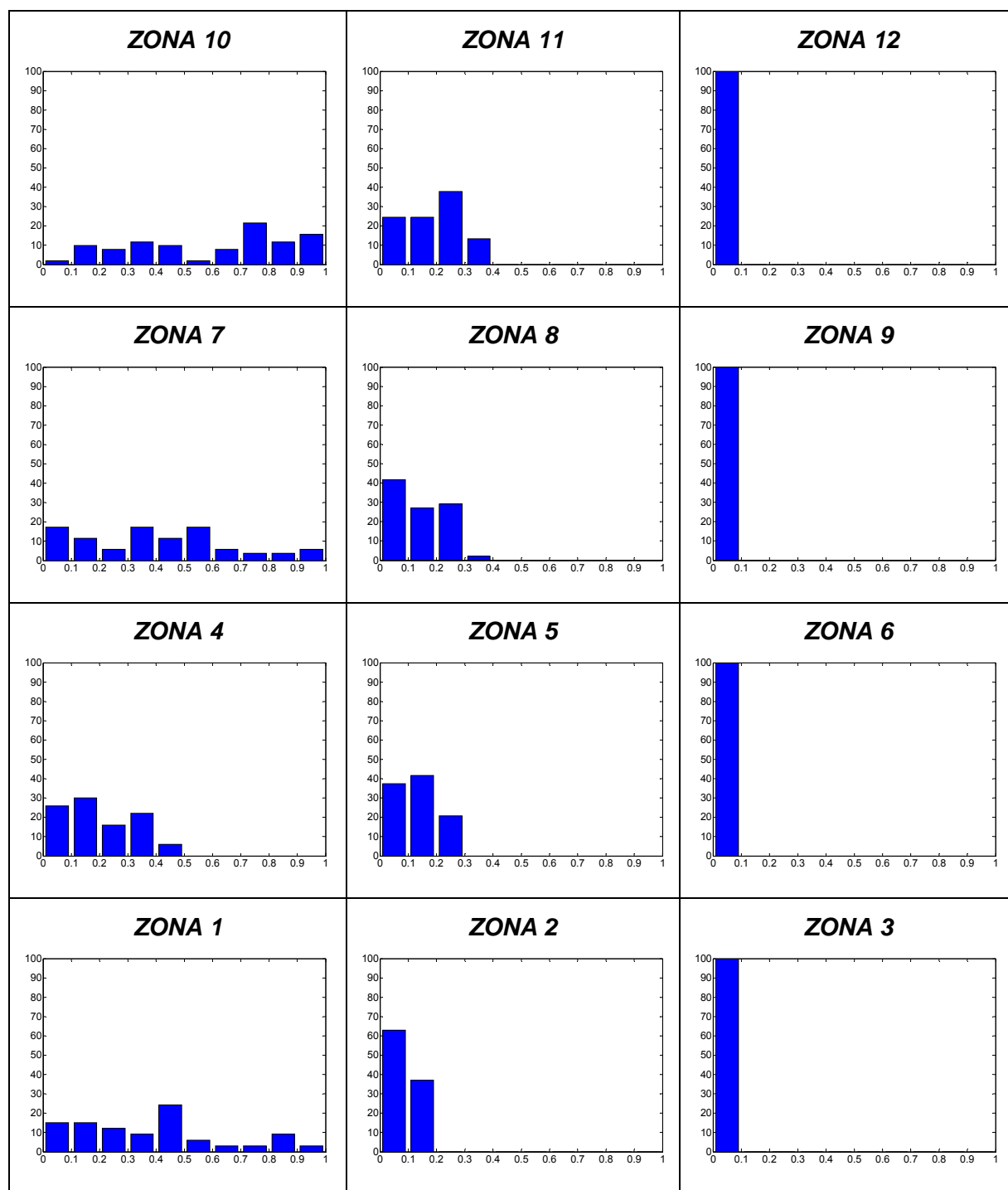


Figura B.20. Prova2 – Histogrames de les emissivitats corresponents a la Fase 2 de la flama a cada zona d'estudi.



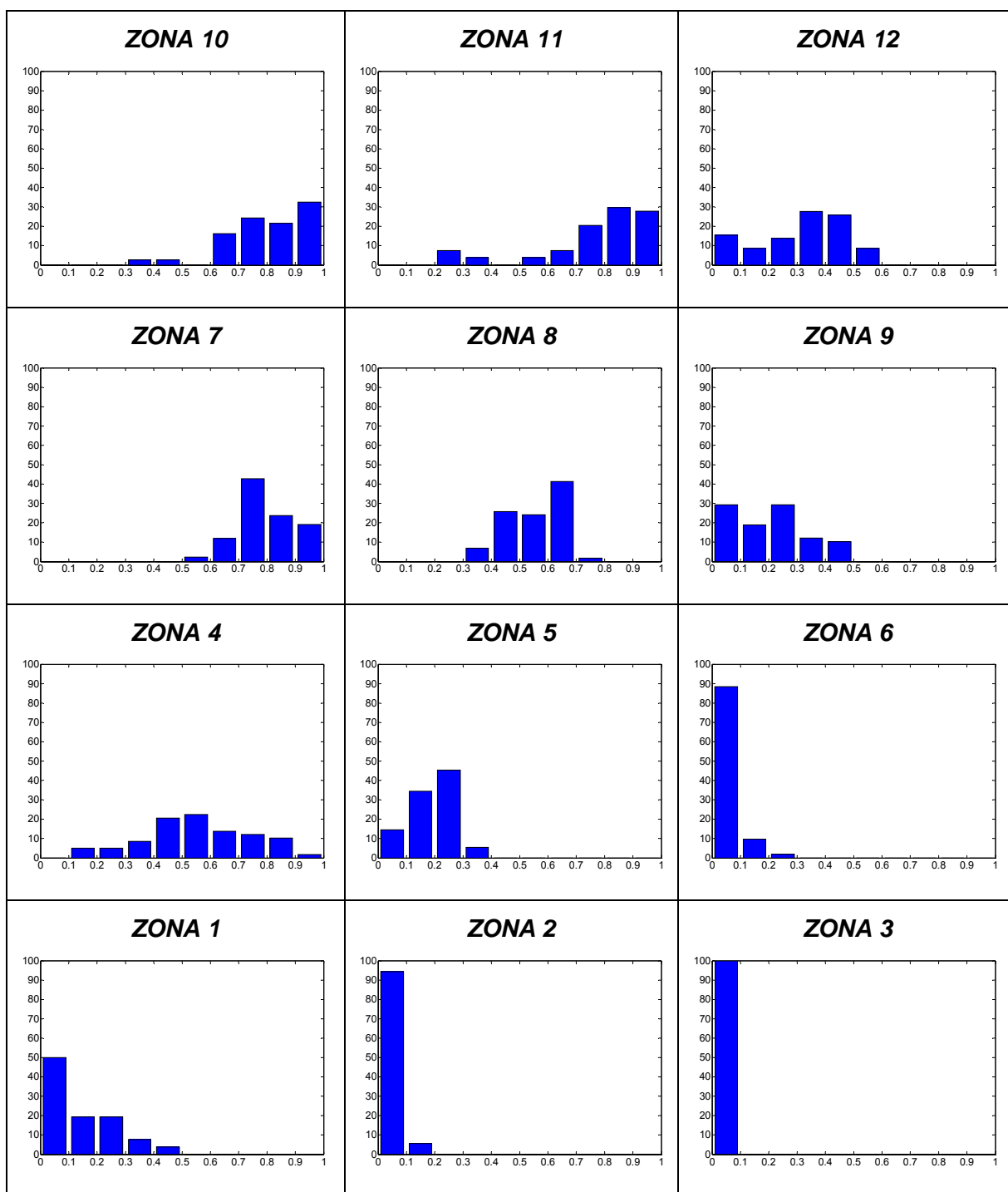


Figura B.21. Prova2 – Histogrames de les emissivitats corresponents a la Fase 3 de la flama a cada zona d'estudi.



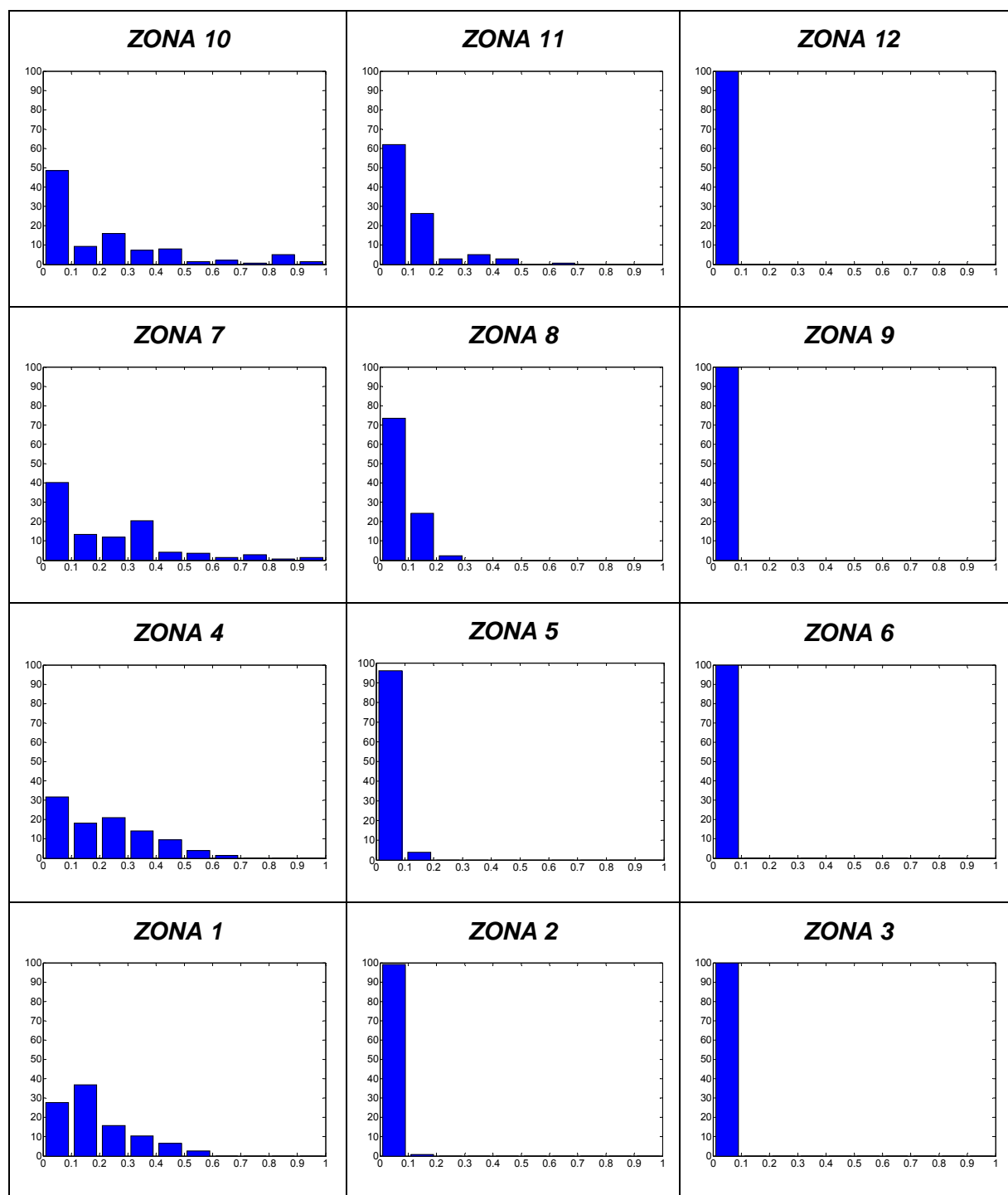


Figura B.22. Prova2 – Histogrames de les emissivitats corresponents a la Fase 4 de la flama a cada zona d'estudi.



B.3. Resultats de la Prova 3 (010206_2)

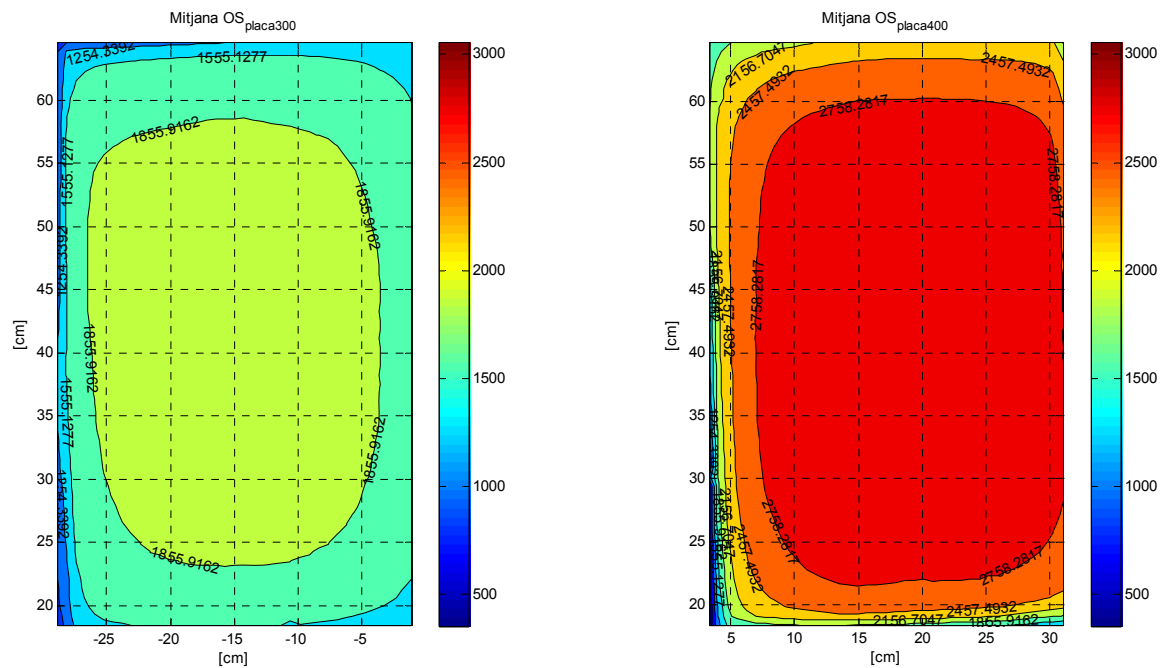


Fig. B.23. Prova3 – Matrius mitjanes de senyal per a les dues plaques sense flama al davant.

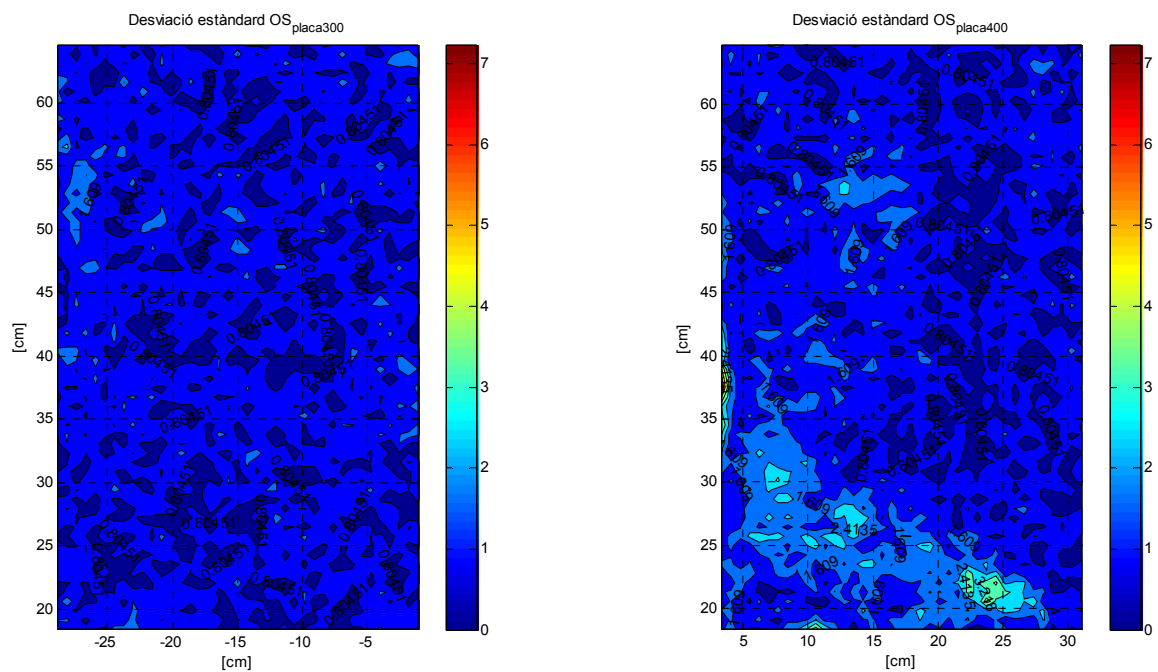


Fig. B.24. Prova3 – Desviacions estàndards de les plaques sense flama al davant.



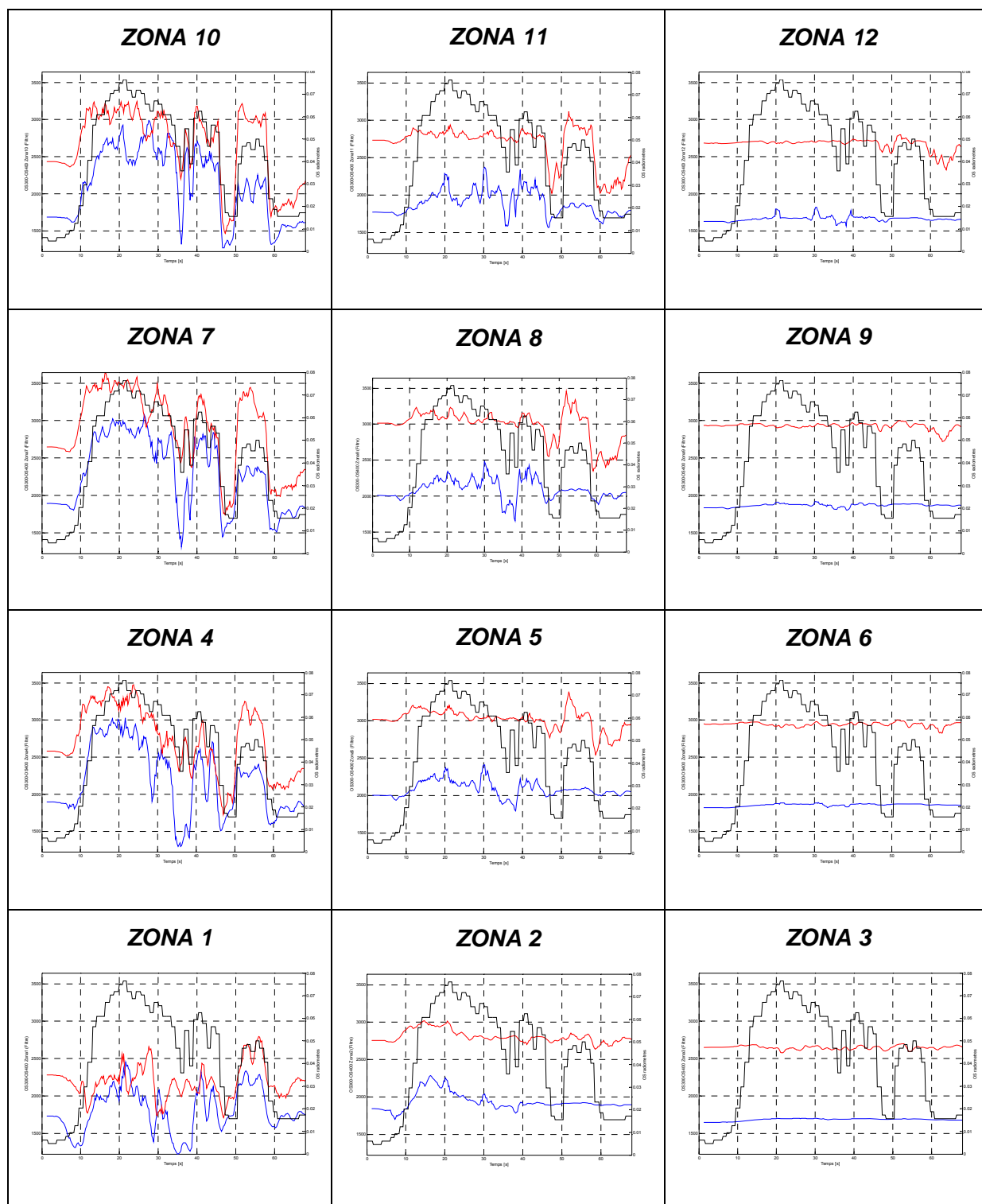


Figura B.25. Prova3 – Evolució respecte el temps dels valors de senyal OS_{300} , OS_{400} i flux dels radiòmetres a cada zona d'estudi especificada.



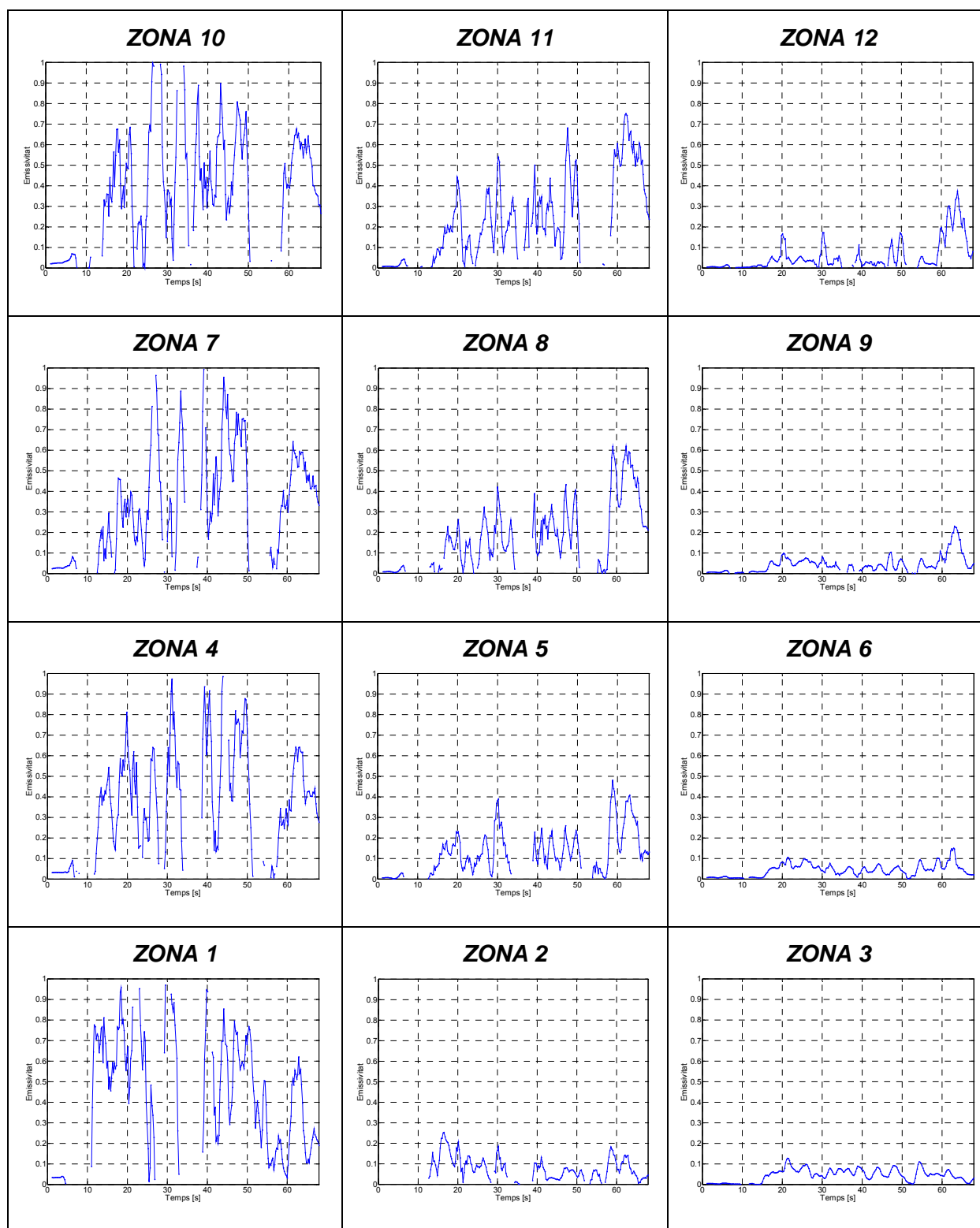


Figura B.26. Prova3 – Evolució de l'emissivitat respecte el temps a cada zona d'estudi especificada.



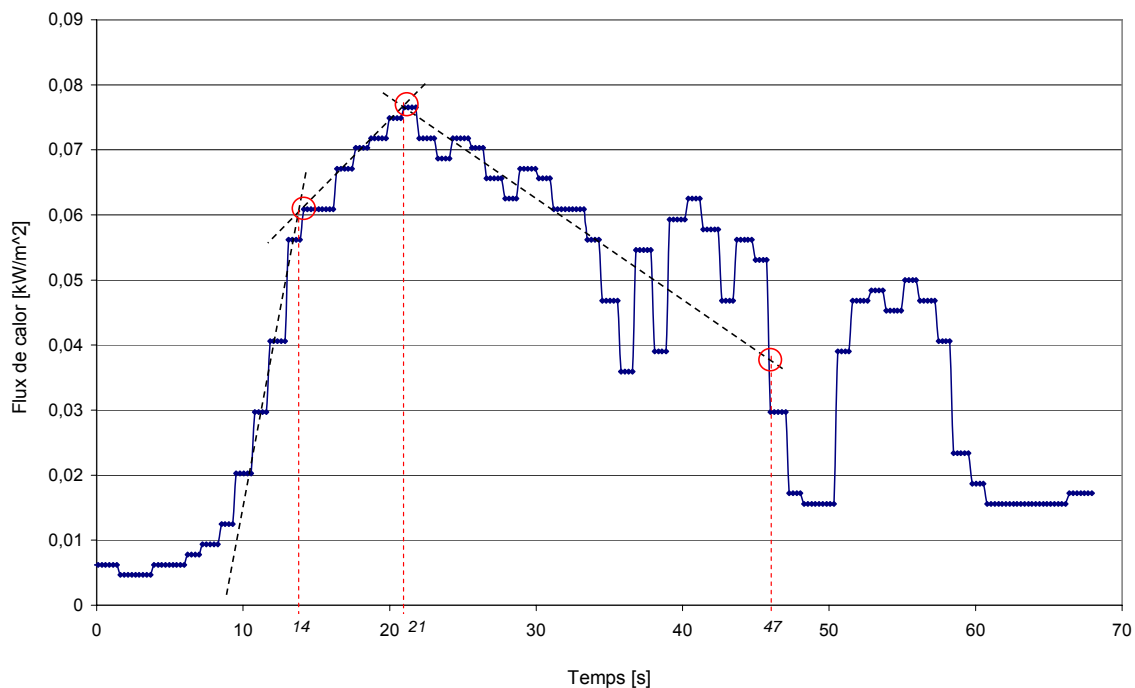


Figura B.27. Prova3 – Gràfic temporal del flux de calor. Càlcul de les diferents fases de la flama.

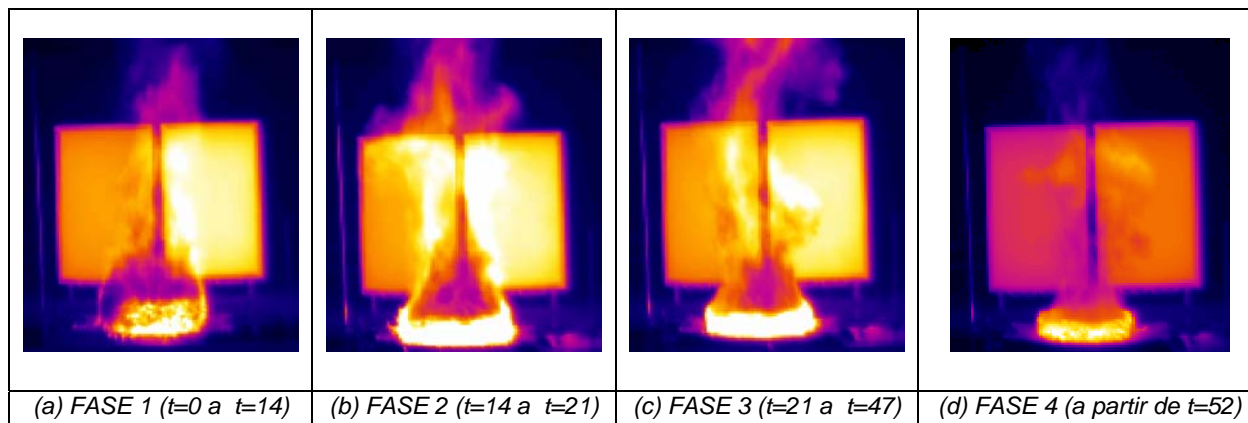


Figura B.28. Prova3 – Imatges termogràfiques representatives de cadascuna de les fases de la flama.



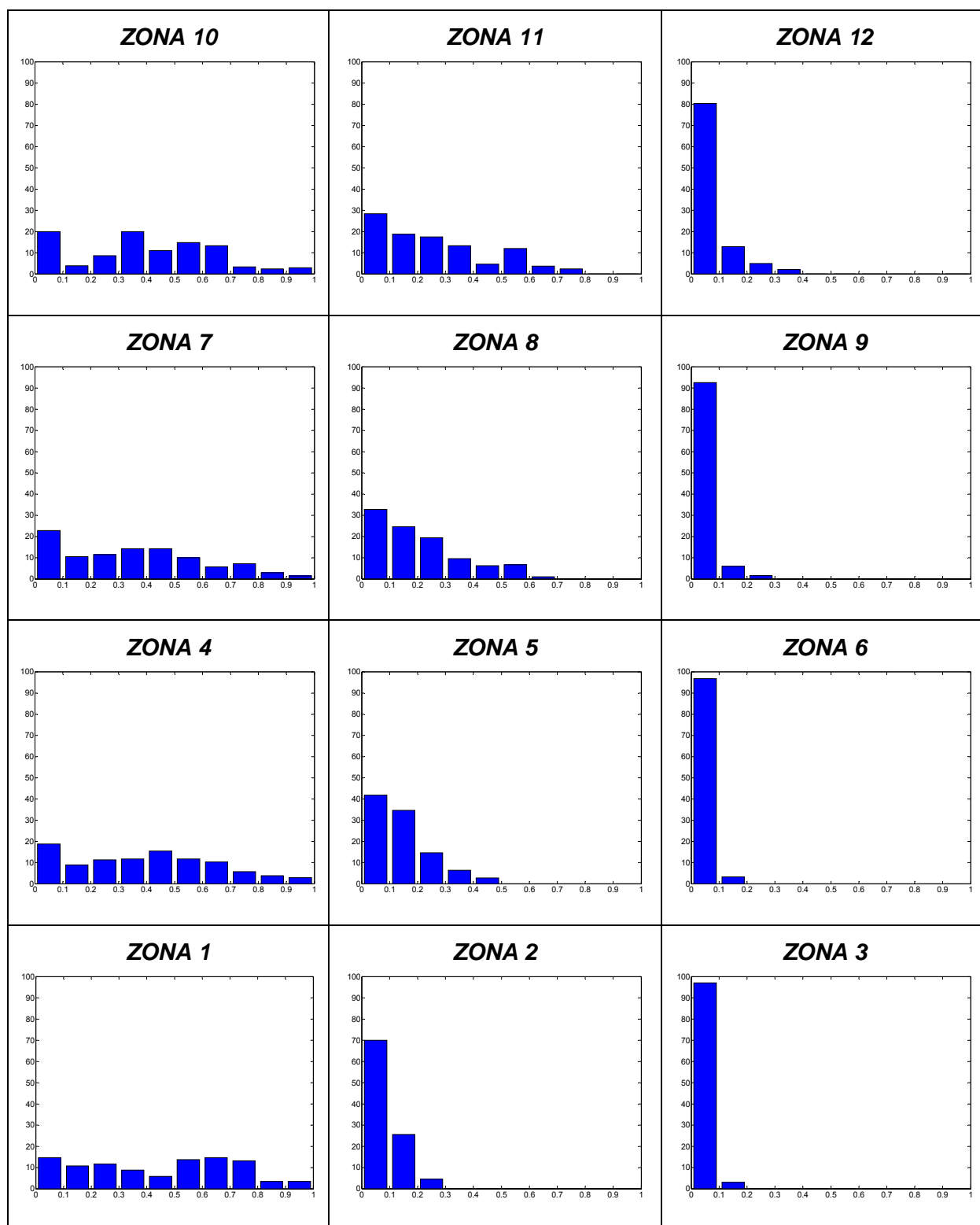


Figura B.29. Prova3 – Histogrames de les emissivitats durant tota la seqüència a cada zona d'estudi.



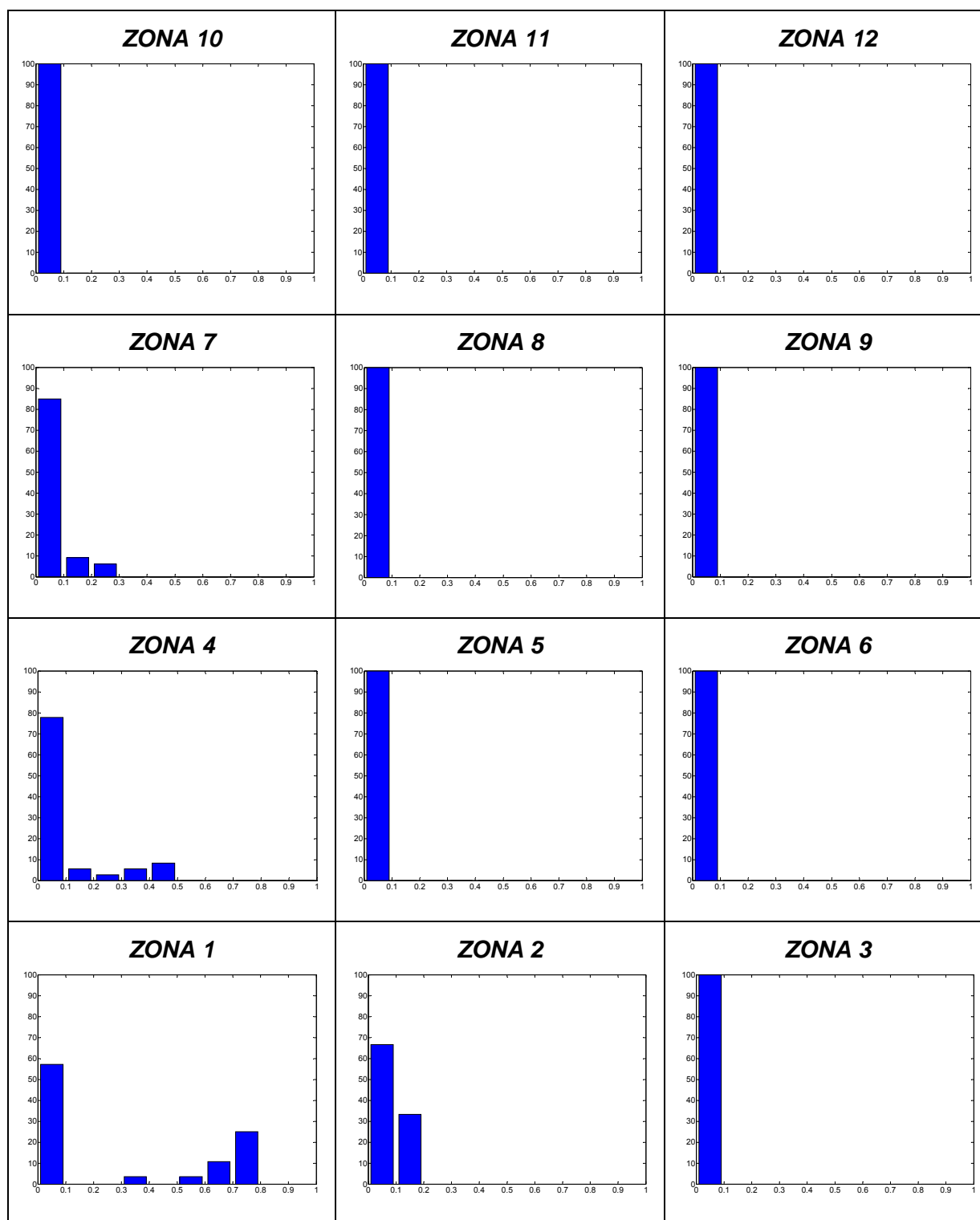


Figura B.30. Prova3 – Histogrames de les emissivitats corresponents a la Fase 1 de la flama a cada zona d'estudi.



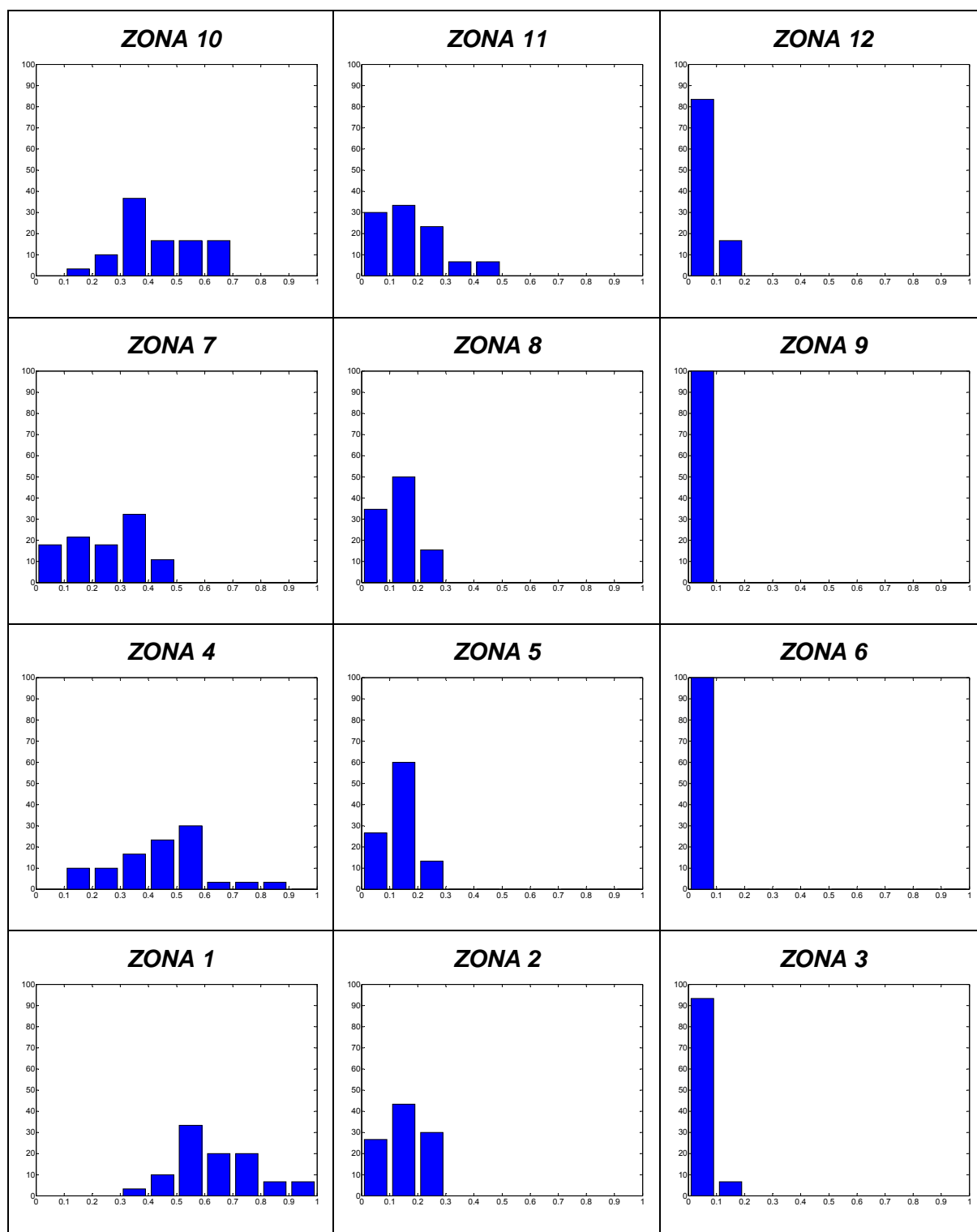


Figura B.31. Prova3 – Histogrames de les emissivitats corresponents a la Fase 2 de la flama a cada zona d'estudi.



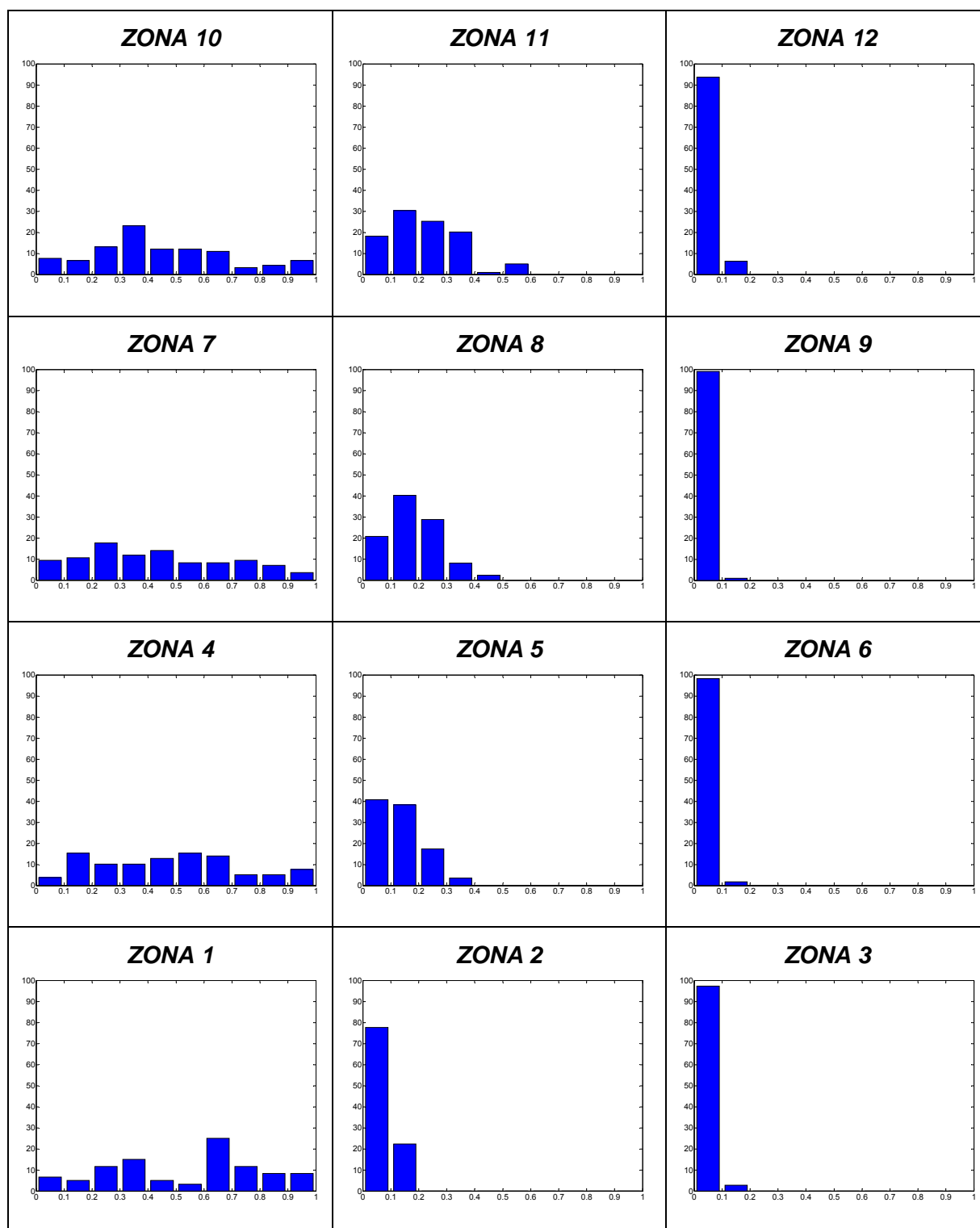


Figura B.32. Prova3 – Histogrames de les emissivitats corresponents a la Fase 3 de la flama a cada zona d'estudi.



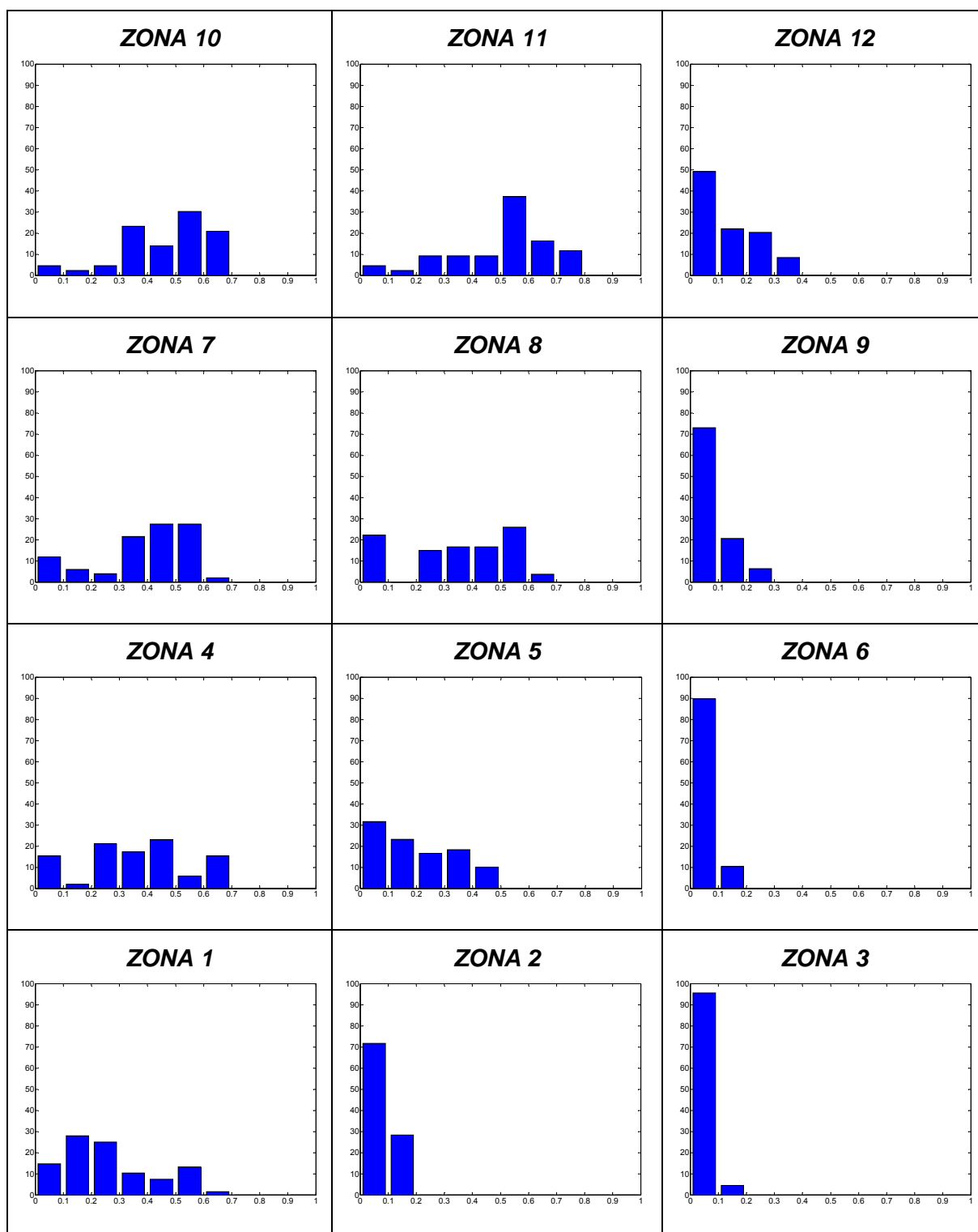


Figura B.33. Prova3 – Histogrames de les emissivitats corresponents a la Fase 4 de la flama a cada zona d'estudi.



B.4. Resultats de la Prova 4 (010206_3)

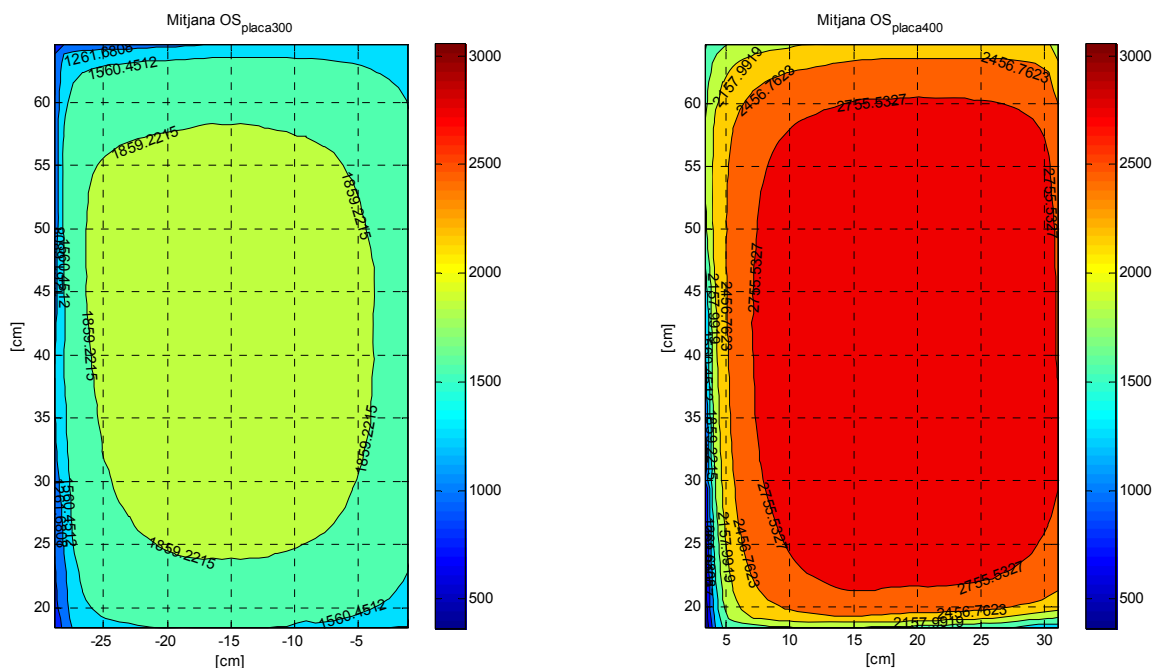


Fig. B.34. Prova4 – Matrius mitjanes de senyal per a les dues plaques sense flama al davant.

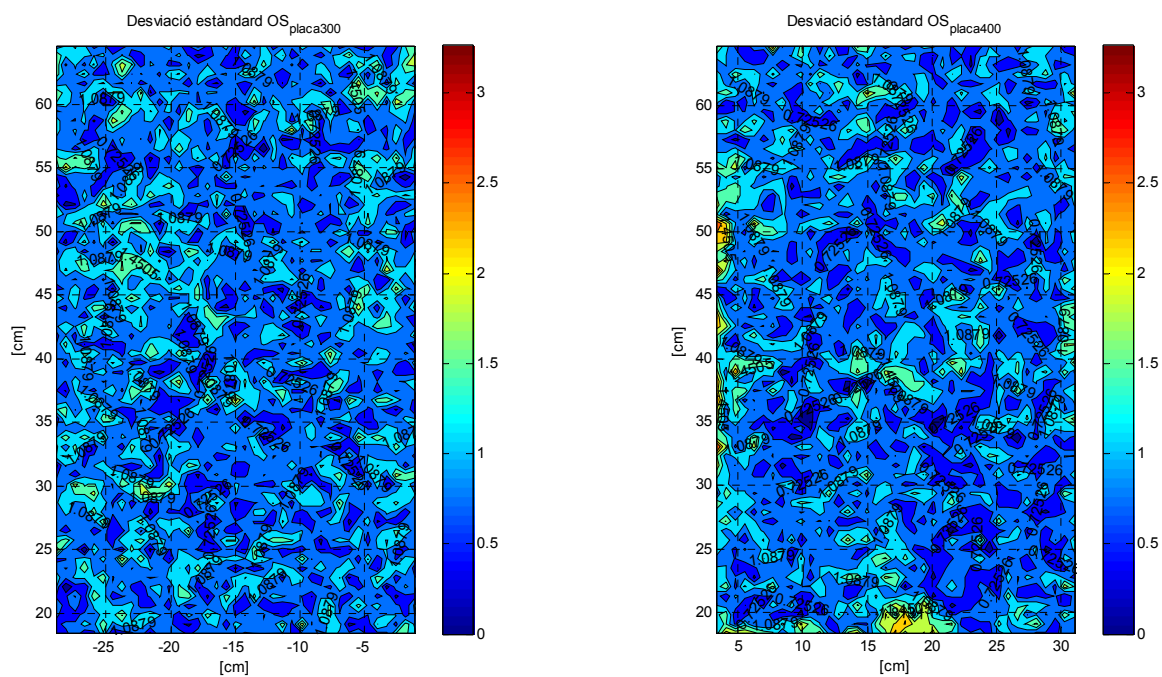


Fig. B.35. Prova4 – Desviacions estàndards de les plaques sense flama al davant.



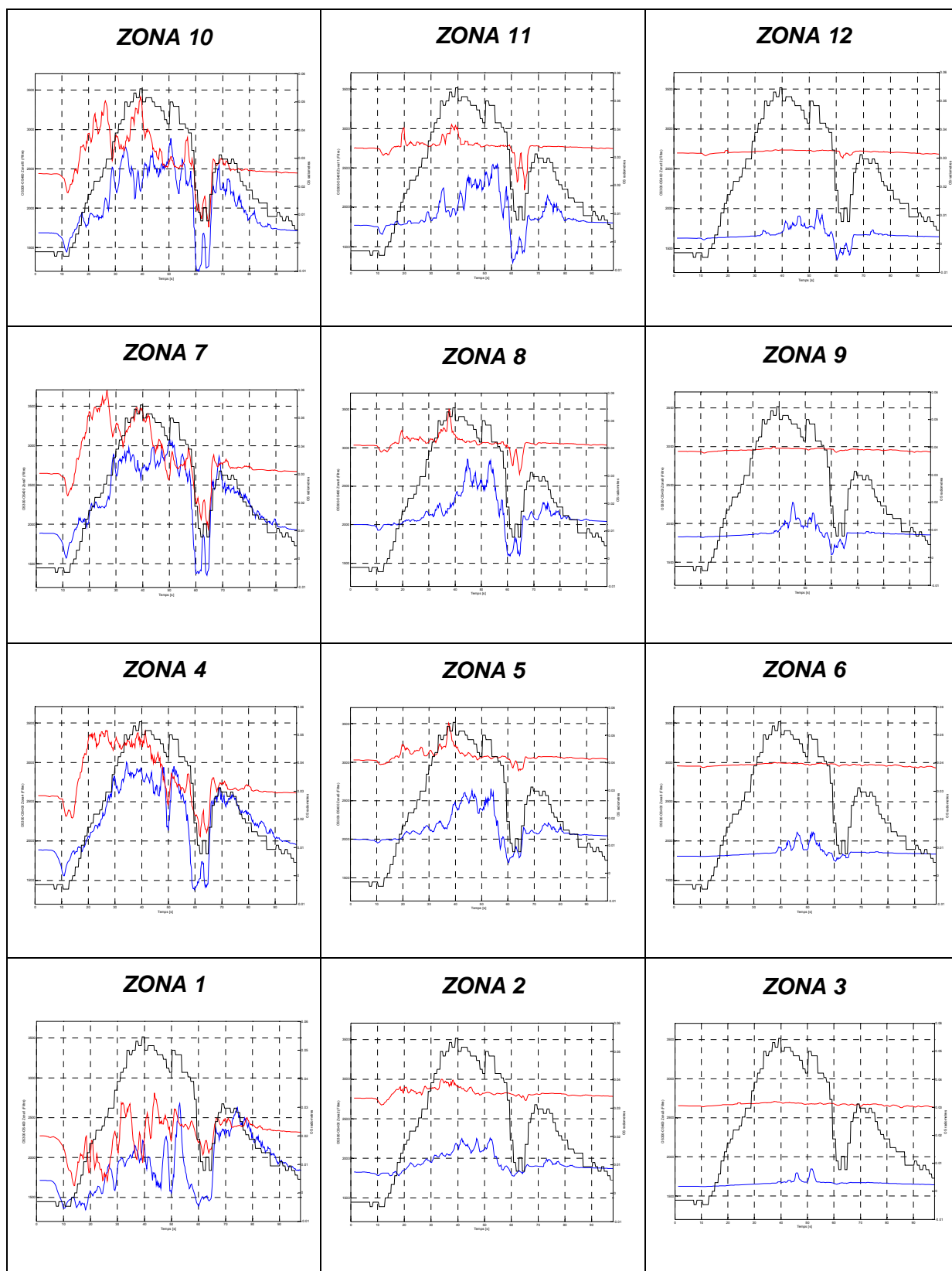


Figura B.36. Prova4 – Evolució respecte el temps dels valors de senyal OS_{300} , OS_{400} i flux dels radiòmetres a cada zona d'estudi especificada.



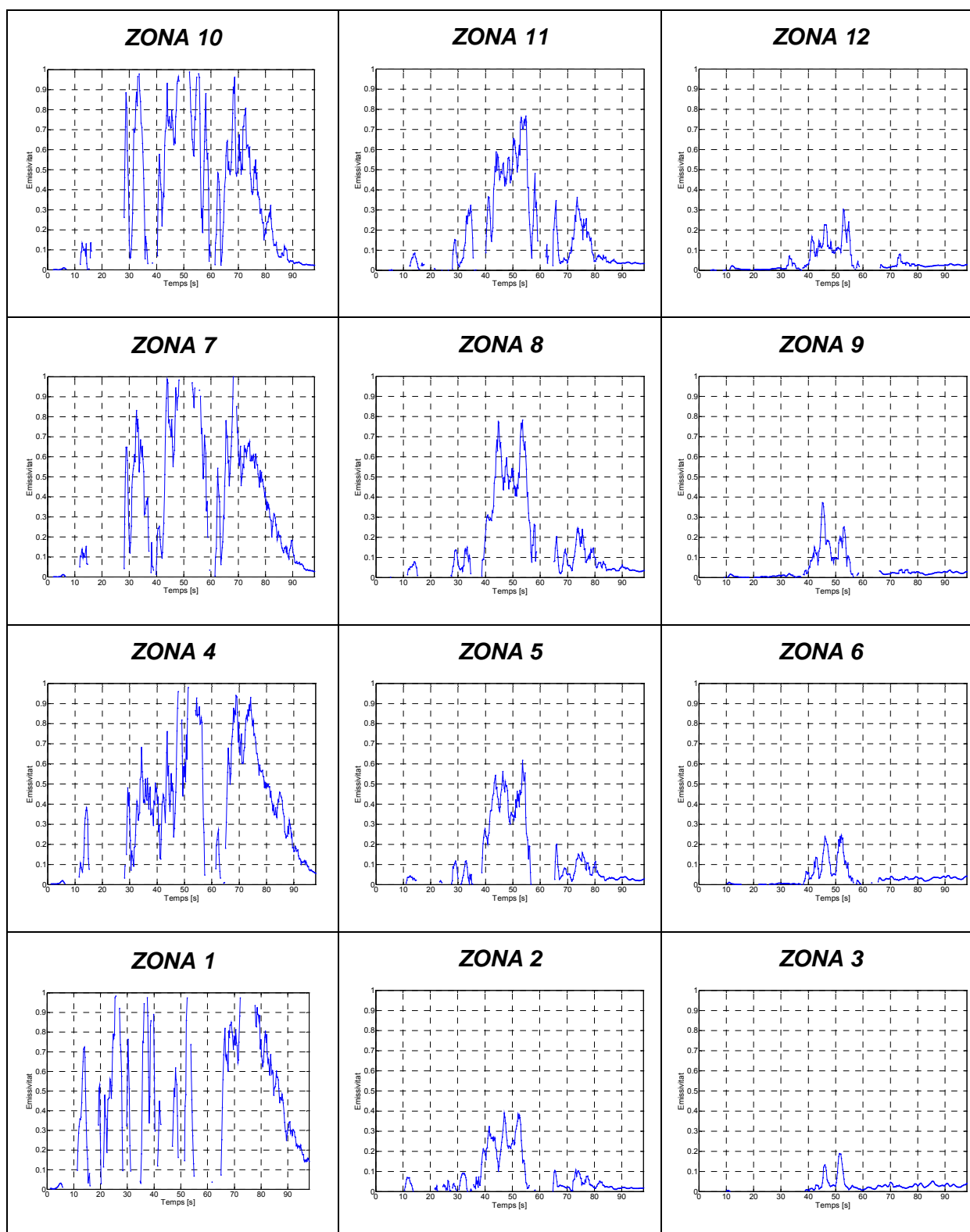


Figura B.37. Prova4 – Evolució de l'emissivitat respecte el temps a cada zona d'estudi especificada.



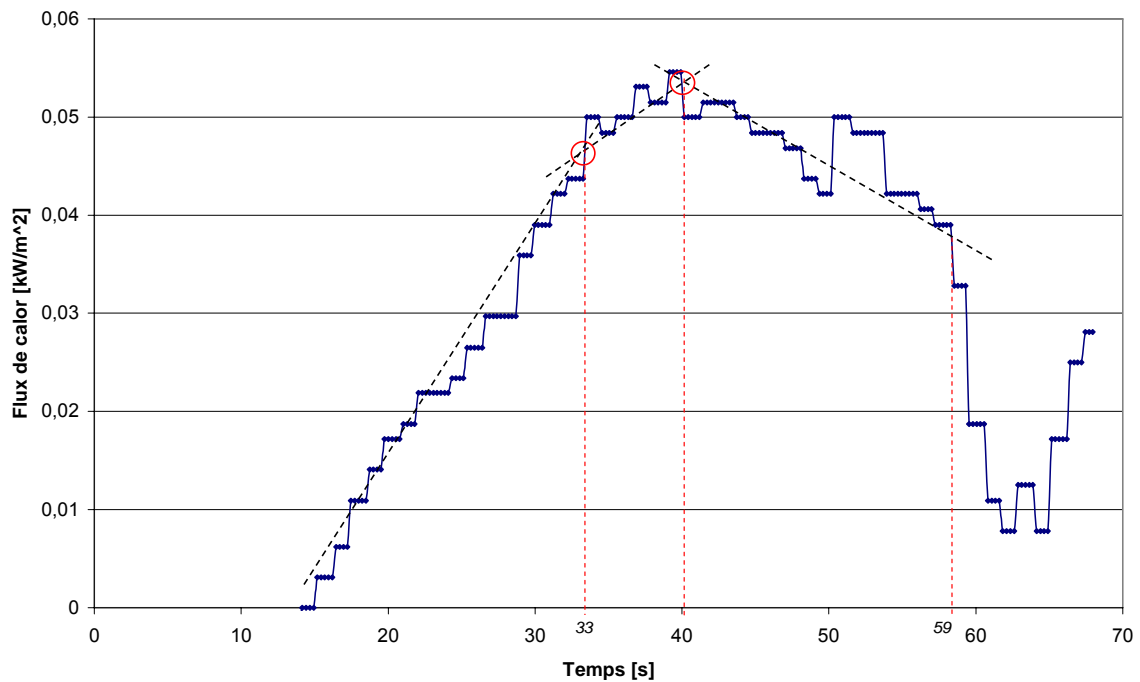


Figura B.38. Prova4 – Gràfic temporal del flux de calor. Càlcul de les diferents fases de la flama.

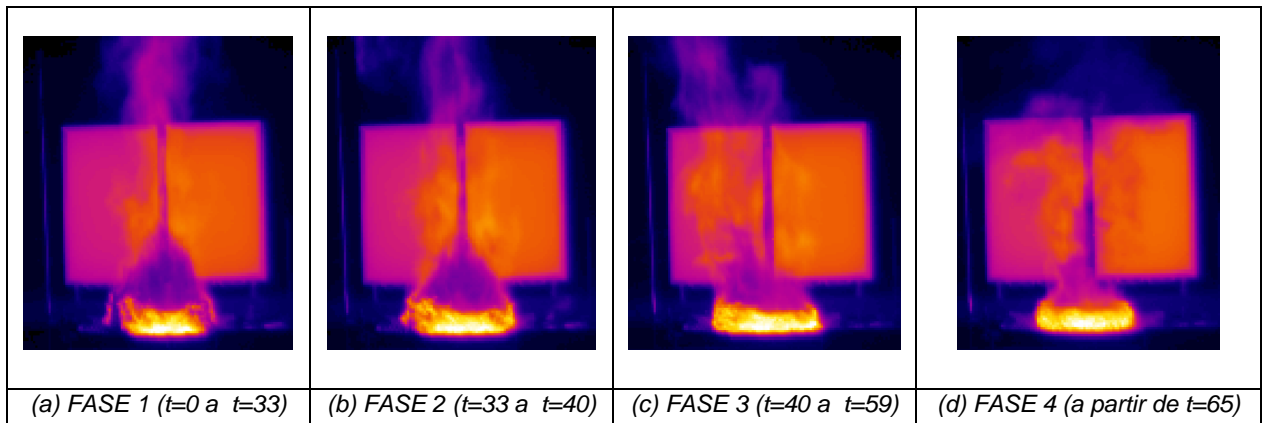


Figura B.39. Prova4 – Imatges termogràfiques representatives de cadascuna de les fases de la flama.



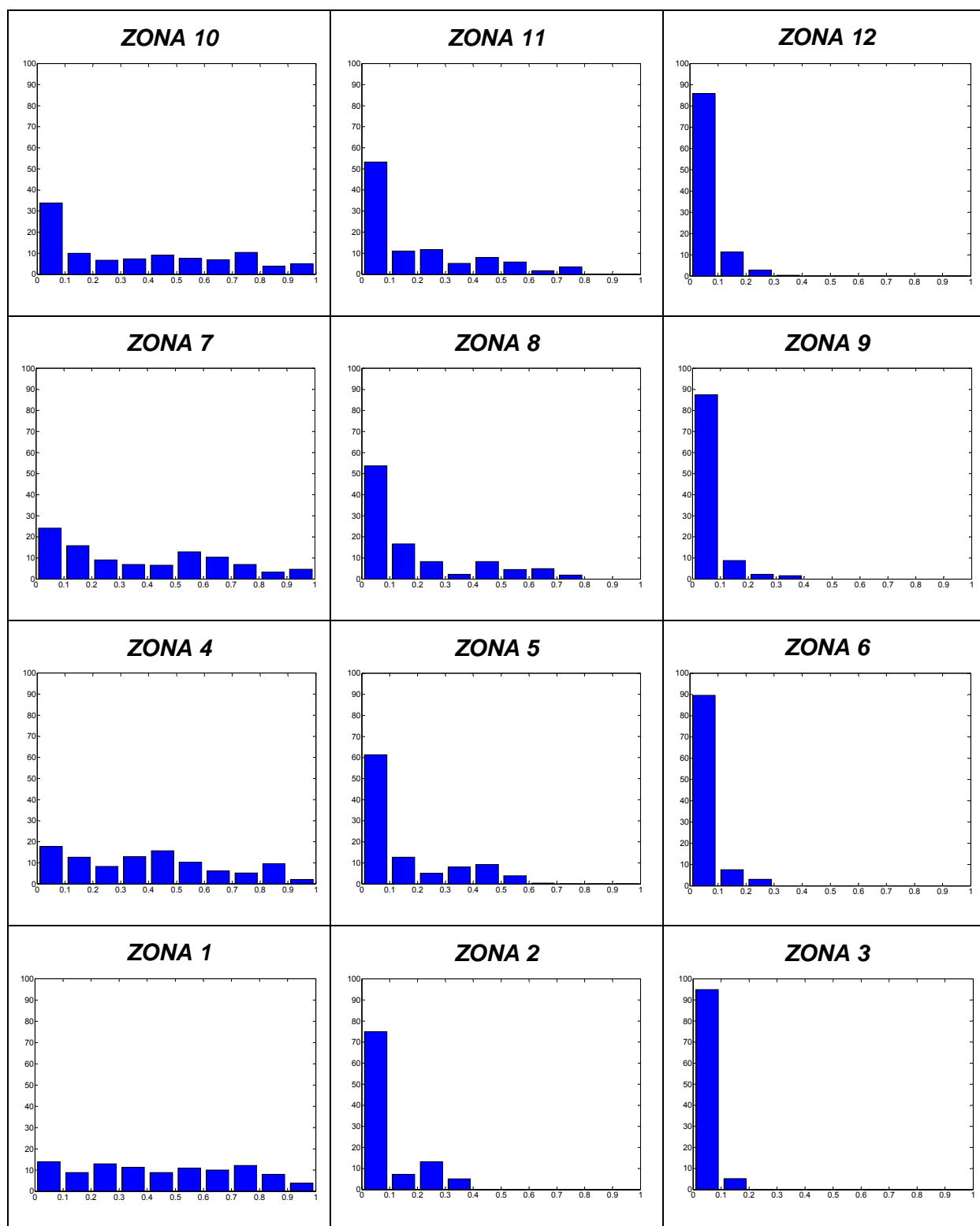


Figura B.40. Prova4 – Histogrames de les emissivitats durant tota la seqüència a cada zona d'estudi.



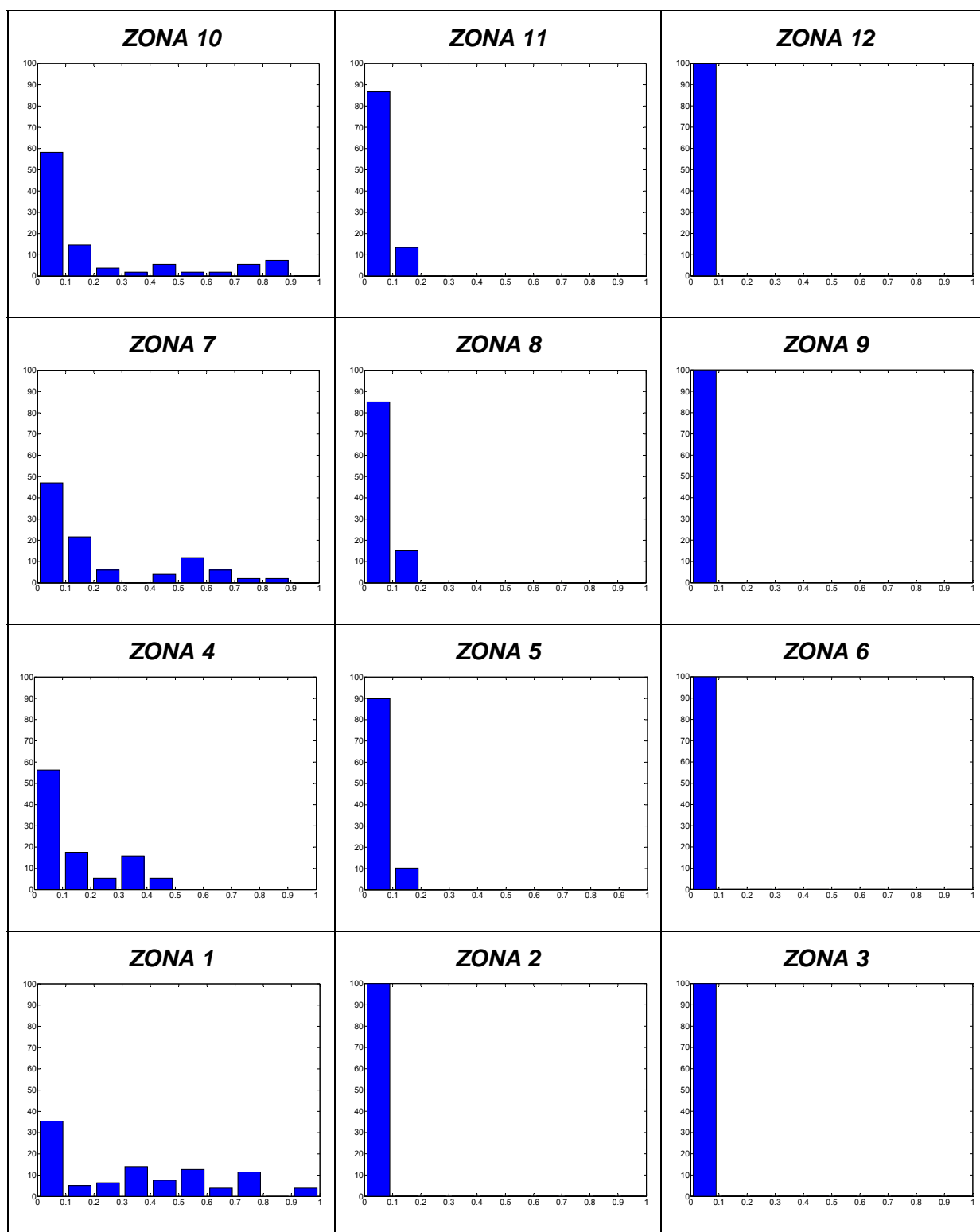


Figura B.41. Prova4 – Histogrames de les emissivitats corresponents a la Fase 1 de la flama a cada zona d'estudi.



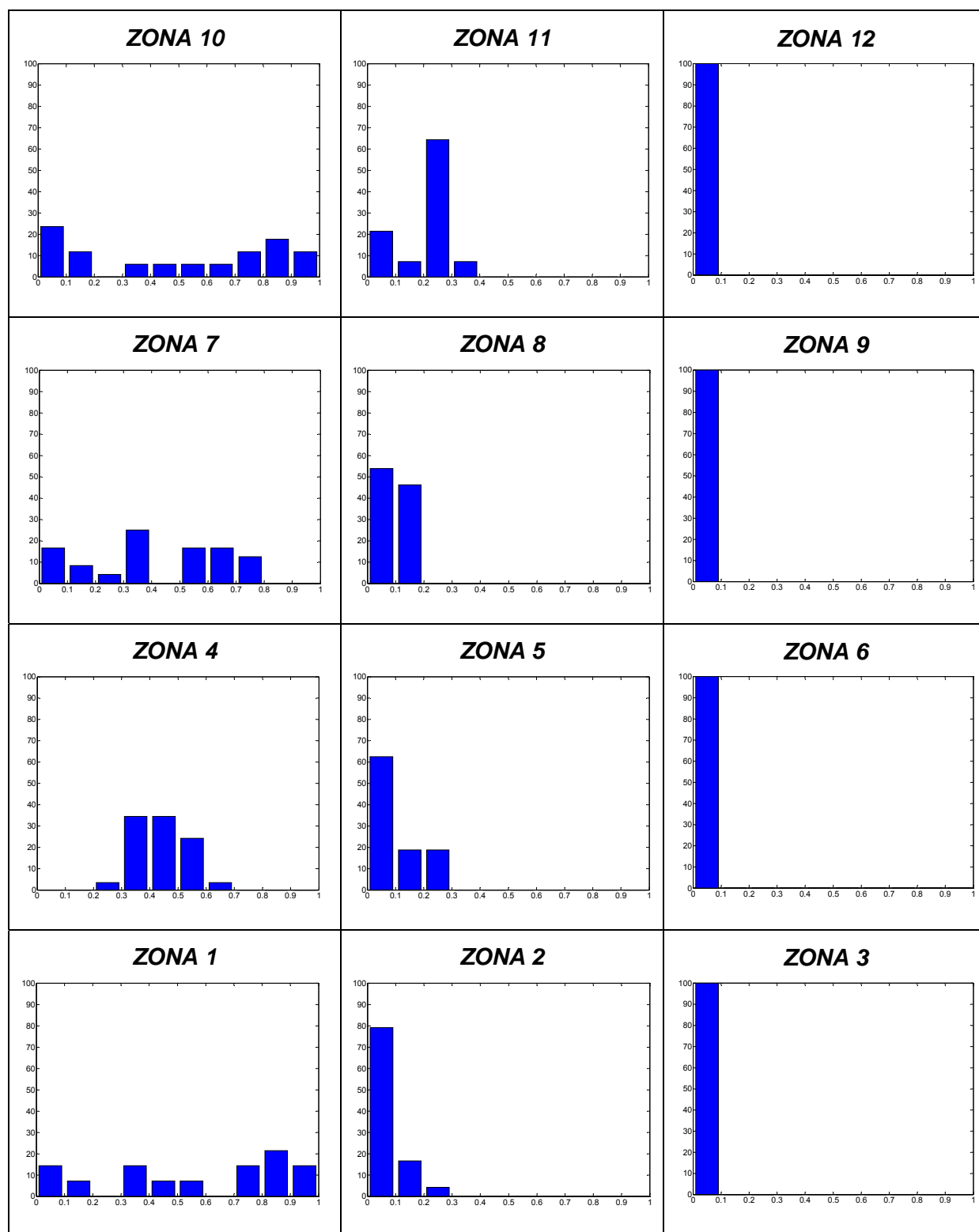


Figura B.42. Prova4 – Histogrames de les emissivitats corresponents a la Fase 2 de la flama a cada zona d'estudi.



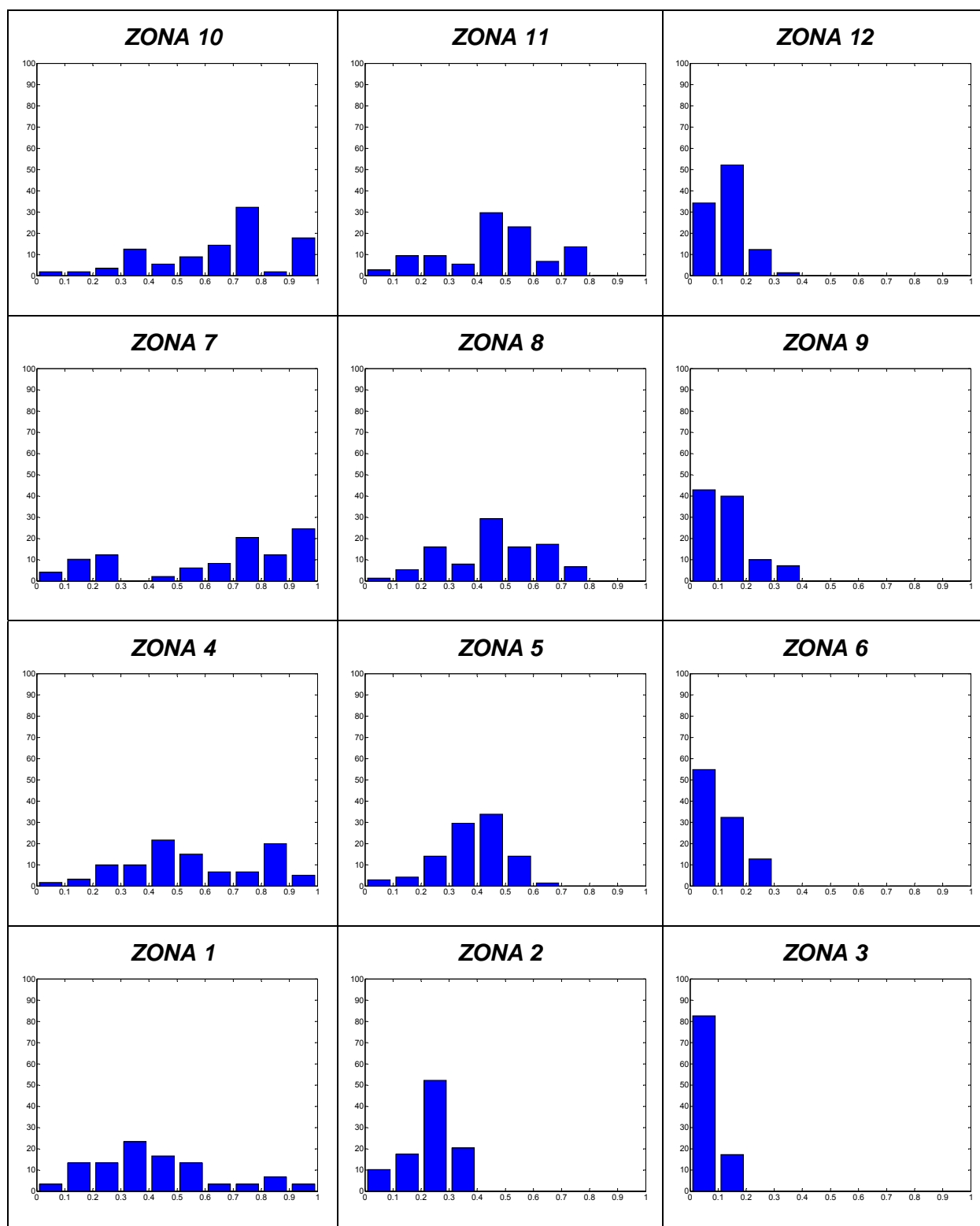


Figura B.43. Prova4 – Histogrames de les emissivitats corresponents a la Fase 3 de la flama a cada zona d'estudi.



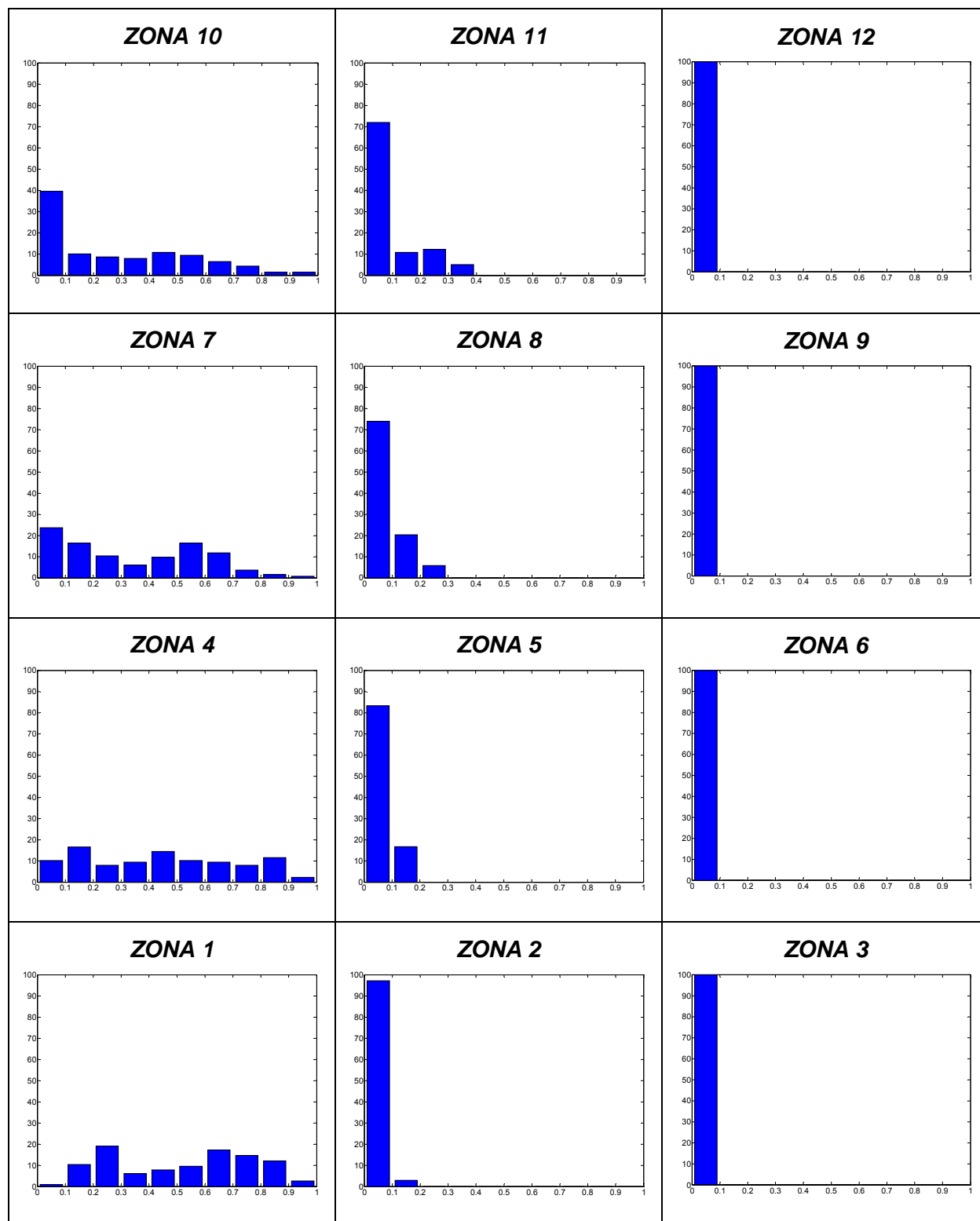


Figura B.44. Prova4 – Histogrames de les emissivitats corresponents a la Fase 4 de la flama a cada zona d'estudi.



C. Pressupost

A continuació, es detalla la relació de despeses ocasionades durant la realització d'aquest projecte associades a les diferents fases en què aquest s'ha portat a terme, és a dir, execució de les proves experimentals, tractament i anàlisi de dades i càlcul de resultats. Les diferents despeses es troben separades en tres categories que són el cost de la instal·lació experimental i el cos dels recursos –materials i humans- consumits.

C.1. Instal·lació experimental

En primer lloc, cal tenir en compte que la instal·lació en la qual han estat realitzades les proves experimentals ja existia abans d'iniciar-se aquest projecte. Tot i així, cal considerar la depreciació funcional soferta per la taula de combustió, segons una amortització anual del 10% respecte el cost inicial de la taula i una duració aproximada de la fase experimental – proves preliminars i proves definitives- de 6 mesos. Sabent que el cost de construcció de la instal·lació fou de 10000€, s'estima que el cost total en concepte d'execució de les proves experimentals que cal incloure es el pressupost és de **500€**



C.2. Recursos materials

Dels diferents recursos materials emprats en la realització d'aquest projecte, cal distingir tres categories que són equips utilitzats durant l'experimentació, material associat a l'experimentació i altres recursos materials.

Equips utilitzats durant l'experimentació

En l'execució de les proves experimentals han estat utilitzats equips propietat del CERTEC (Centre d'Estudis del Risc Tecnològic) que ja havien estat adquirits prèviament per a la realització de proves similars amb diferents tipus de combustible. Únicament ha estat necessària l'adquisició de les dues plaques calefactores de 300°C i 400°C. Així, el cost associat a tots els equips ha estat únicament l'amortització associada a la seva utilització, també per als equips de nova adquisició doncs està previst d'emprar-los en futurs programes experimentals. A la Taula C.1 es presenten els valors de depreciació en funció del cost inicial dels diferents equips.

Taula C.1. Costos associats als equips emprats en l'experimentació.

Equips	Cost inicial [€]	Amortització [€]
Plaques calefactores	1800,00	90,00
Estufa	3800,00	190,00
Balança BL600	480,81	24,04
Càmera termogràfica ²	87748,00	4387,40
Càmera de vídeo	902,00	45,10
Transductor de flux simple	1117,10	55,86
Transductor de flux dual	2784,00	139,20
Mòdul <i>Fieldpoint</i>	3016,00	150,80
PC Toshiba Satellite Pro	1392,00	69,60
TOTAL		5152,00

Material associat a l'experimentació

Dins aquesta categoria s'inclou el material que ha estat necessari per a la correcta execució de les proves experimentals, com són les cintes de vídeo, la paella on es crea la flama font d'ignició del llit de combustible, l'alcohol emprat per a crear aquesta flama, etc. Cal destacar que el combustible –agulles de pi- no suposa cap cost addicional doncs va ser

² El cost de la càmera termogràfica també inclou el cost del programa *ThermaCam Researcher*. El cost del programa *FireaAll Forest*, realitzat per personal de CERTEC es considera a l'apartat C.3. Recursos Humans.



recollit de la coberta morta d'una pineda. A la Taula C.2 es presenten els costos corresponents als diferents materials emprats durant l'experimentació.

Taula C.2. Costos associats al material emprat en l'experimentació.

Material	Quantitat	Cost unitari [€]	Cost total [€]
Cintes de vídeo	2	5,80	11,60
Paella	1	6,00	6,00
Safates d'alumini	10	0,40	4,00
Alcohol	3	1,50	4,50
TOTAL			26,10

Altres recursos materials

Dins aquesta categoria s'han d'incloure la resta de despeses associades a la realització d'aquest projecte, com són l'amortització dels equips informàtics propietats del CERTEC, el material d'oficina necessari per a l'elaboració d'aquest estudi i finalment el consum de llum i aigua. A la Taula C.3 es presenten aquests costos associats a altres recursos materials.

Taula C.3. Costos associats a la resta de recursos materials emprats.

Concepte	Cost [€]
Amortització dels equips informàtics	125,60
Material d'oficina	78,20
Subministres	150,30
TOTAL	354,10



C.3. Recursos humans

En aquest apartat de costos associats a recursos humans, bàsicament es contemplen les hores de dedicació de la persona encarregada del projecte així com de les persones que han col·laborat, sobretot en la fase d'experimentació. Considerant la duració del projecte, 18 mesos, amb una dedicació de 20 dies mensuals i 3 hores diàries, s'estima un temps total invertit de 1080 hores. Tenint en compte la tarifa actual d'un enginyer químic, 35€/hora, s'obté una despesa de 37800€. S'afegeixen 15000€ per la dedicació de persones externes – inclou el cost del programa *FireAll Forest*, realitzat per personal del CERTEC-. S'obté un total de **52800€**



C.4. Import total

A continuació, a la Taula C.4 es presenta amb detall el cost total de les despeses resultants de la realització d'aquest projecte.

Taula C.4. Import total associat a la realització del projecte.

Concepte	Cost [€]
Instal·lació experimental	500,00
Recursos materials	5532,00
Equips experimentació	5152,00
Material experimentació	26,10
Altres recursos materials	354,10
Recursos humans	52800,00
SUBTOTAL	58832,00
Imprevistos (10%)	5883,20
TOTAL	64715,20





D. Avaluació d'impacte ambiental

D.1. Descripció general del projecte

Abans de procedir a presentar l'impacte ambiental que ha suposat la realització d'aquest projecte, així com les mesures preventives pertinents que cal prendre, és necessari distingir les dues fases en què s'ha desenvolupat l'estudi. D'una banda, la fase experimental ha consistit en l'experimentació realitzada principalment a la taula de combustió de la planta pilot. D'altra banda, la fase d'anàlisi ha consistit bàsicament en l'estudi i interpretació de les dades obtingudes en la realització de les diferents proves. Cal tenir en compte que, des del punt de vista ambiental, ambdues fases presenten un tipus d'impacte molt diferent.

Durant el transcurs de la fase experimental, s'han portat a terme un total de 17 focs (13 proves preliminars i 4 proves definitives) desenvolupats durant un període aproximat de 8 mesos. Com ja s'ha dit, aquests s'han realitzat a la planta pilot ubicada al Pavelló G, planta - 1, de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona (ETSEIB), espai especialment habilitat per al desenvolupament de processos experimentals en diversos camps de l'enginyeria aplicada a la indústria química. Així doncs, la ubicació de la taula de combustió i la resta d'equips de mesura i adquisició de dades en aquest emplaçament, no suposa cap alteració en l'ús del sòl. A més, aquest espai no es pot considerar un entorn d'alta riquesa i qualitat ambiental.

D'altra banda, la fase d'anàlisi s'ha realitzat a les instal·lacions del CERTEC, també ubicat a l'ETSEIB i ha servit per avaluar totes les dades obtingudes durant l'experimentació. Aquesta etapa del projecte s'ha realitzat a temps parcial durant un període aproximat de 12 mesos, combinant-se en certs moments amb la fase experimental per tal d'avançar adequadament amb l'estudi.



D.2. Estudi d'alternatives

A l'hora d'avaluar les diferents alternatives que presenta el desenvolupament d'aquest projecte, cal tenir en compte que la ubicació de la instal·lació experimental està fixada des de l'inici, de manera que únicament s'hauran de considerar alternatives referents a les característiques de les diferents proves a realitzar.

La principal variable susceptible de requerir un estudi d'alternatives és la superfície emprada per a realitzar les proves. La taula de combustió disposa d'una superfície útil de 4,8 m², superfície màxima que es pot emprar per a la realització dels focs. És evident que, com més gran sigui la superfície utilitzada en els diferents experiments, més gran serà la quantitat de combustible necessària i, per tant, l'emissió de fum produïda. Així, amb l'objectiu d'aconseguir un correcte desenvolupament de les proves amb un mínim impacte ambiental, es decideix fixar a la metodologia experimental l'ús d'una superfície d'aproximadament 0,1 m².



D.3. Descripció del medi

El medi en el qual té lloc la realització de les proves experimentals i que, conseqüentment, absorbeix els impactes generats per l'execució d'aquestes és un medi urbà –com s'ha comentat, el projecte s'ha desenvolupat a l'ETSEIB- i, per tant, no té una qualitat ambiental excepcional.

Tanmateix, la ubicació de la instal·lació on s'han realitzat les proves, així com les diferents infraestructures de què disposa la planta pilot, fan d'aquest espai el lloc idoni per a desenvolupar el projecte, ja que és un espai destinat a la realització del programa experimental. Per això, el desenvolupament de les proves no modificarà de forma substancial els nivells de qualitat del medi ambient immediat ni dels elements que el conformen, incloent el context social i econòmic i, en cap cas, provocarà que aquests no compleixin els límits legals.



D.4. Identificació i valoració dels impactes sobre el medi

En aquest apartat, s'analitzen els diferents impactes potencials que el projecte podria tenir sobre el medi ambient durant les dues fases que composen l'estudi –experimentació i anàlisi de resultats–, i que poden ser deguts a:

- l'existència del projecte
- la utilització dels recursos naturals
- l'emissió de contaminants (a l'atmosfera, a l'hidrosfera i a la litosfera), la formació de substàncies nocives o el tractament de residus.

Criteris d'avaluació

A l'*Anexo 1 del Real Decreto 1131/1988 de 30 de septiembre*, pel qual s'aprova el *Reglamento para la ejecución del Real Decreto Legislativo 1302/1986, de 28 de Junio, de Evaluación de Impacto Ambiental*, s'inclouen un seguit de definicions tècniques imprescindibles per a la valoració dels impactes ambientals considerats significatius. Aquests termes es refereixen als diferents tipus d'efectes que poden donar lloc als impactes derivats d'un projecte i són:

En funció del tipus d'efecte:

- *Efecte positiu*. Aquell que és admès com a tal, tant per la comunitat científica com per la població en general, en el context d'una anàlisi completa dels costos i beneficis genèrics i de les eventualitats externes de l'actuació contemplada.
- *Efecte negatiu*. Aquell que es tradueix en la pèrdua de valor natural, estètic-cultural, paisatgístic, de productivitat ecològica; o en un augment dels perjudicis derivats de la contaminació, de l'erosió i altres riscos ambientals en discordança amb l'estructura ecològica-geogràfica, el caràcter i la personalitat de una localitat determinada.

En funció de la incidència de l'efecte:

- *Efecte directe*. Aquell que té una incidència immediata en algun aspecte mediambiental.
- *Efecte indirecte o secundari*. Aquell que suposa una incidència immediata respecte a la interdependència o, en general, respecte a la relació d'un sector ambiental amb un altre.



A continuació, s'indiquen les diferents definicions sobre la magnitud de la valoració d'un impacte ambiental potencial, que fa referència al seu caràcter de compatibilitat ambiental:

- *I.A. Compatible.* Aquell en el qual la recuperació és immediata en finalitzar l'activitat i no requereix de mesures protectores.
- *I.A. Moderat.* Aquell en el qual la recuperació no precisa de mesures protectores o correctores intensives, però que per recuperar les condicions inicials requereix un cert temps.
- *I.A. Sever.* Aquell en el qual la recuperació de les condicions del medi exigeix l'adequació de mesures protectores o correctores, a més d'un període dilatat de temps.
- *I.A. Crític.* Aquell que presenta una magnitud superior al límit acceptable, produint-se una pèrdua permanent de la qualitat de les condicions ambientals, sense possibilitat de recuperació, ni tan sols amb l'adopció de mesures protectores o correctores.

A part d'avaluar els impactes concrets de les diferents relacions causa-efecte, han d'ésser valorats respecte l'impacte global del projecte. La magnitud global del projecte serà positiva si la valoració global és compatible, moderada o severa, mentre que serà negativa si la valoració global és crítica.

Identificació d'impactes. Llista d'activitats

A l'hora de realitzar una avaluació d'impacte ambiental d'un projecte, hi ha unes fases o activitats principals d'aquest que cal considerar i són la construcció, realització i desmantellament de l'activitat. En aquest cas, però, només té sentit analitzar la etapa de realització de l'activitat, doncs la instal·lació ha estat construïda amb anterioritat a aquest estudi, i no està previst el seu desmantellament a mig termini.

En primer lloc, es considera la fase de realització de les proves experimentals, les quals es divideixen en diferents tasques que han estat detallades al capítol 3. Els recursos necessaris per a desenvolupar aquestes tasques són mà d'obra, consum d'electricitat i consum de combustibles –matèria vegetal i alcohol-.

Pel que fa a la fase d'anàlisi, l'activitat que es realitza és el tractament informàtic de les dades obtingudes en l'experimentació. Els recursos que han estat necessaris per a desenvolupar aquesta activitat són el consum d'electricitat i el consum de materials fungibles propis d'oficina com paper, cartutxos d'impressora, etc.



Impactes ambientals potencials

En aquest apartat s'analitzen els possibles impactes ambientals que les diferents activitats definides anteriorment i els recursos necessaris per portar-les a terme poden ocasionar.

En la fase experimental es poden distingir dos tipus d'impactes potencials diferents:

- *Impacte per l'ús de recursos.* Es produeix un consum de combustible vegetal, a més de la mà d'obra i energia elèctrica per a la connexió dels diferents equip de mesura i adquisició de dades.
- *Impacte per emissions.* La principal emissió és el fum resultant dels focs realitzats, de manera que s'emeten bàsicament H₂O, CO₂, CO i algun compost volàtil en proporcions negligibles. Un altre impacte associat a aquesta fase, de tipus indirecte i derivat del consum elèctric és l'emissió de gasos de combustió a les centrals tèrmiques.

Igualment, en la fase d'anàlisi de resultats es distingeixen els dos impactes potencials següents:

- *Impacte per l'ús de recursos.* Es produeix un impacte directe per l'ús de recursos, bàsicament material d'oficina i energia elèctrica com a conseqüència de l'ús dels equips informàtics, condicionament de l'oficina, etc.
- *Impacte per emissions.* Igualment es pot considerar l'existència d'un impacte de tipus indirecte derivat del consum d'energia elèctrica que suposa l'emissió de gasos de combustió a les centrals tèrmiques.

Valoració dels impactes

Tots els impactes derivats d'aquest estudi es poden valorar com a impactes compatibles i, per tant, l'impacte global associat al projecte també, ateses les mesures correctores previstes i que es detallen a continuació.



D.5. Mesures correctores previstes

Per tal de minimitzar els impactes ambientals potencials, tant per a la fase d'experimentació com per a la fase d'anàlisi de resultats, s'han definit una sèrie de mesures correctores que es presenten a continuació:

Fase experimental

- Realització de les proves a la planta pilot de l'Escola Tècnica Superior d'Enginyeria Industrial de Barcelona, en un espai habilitat per al desenvolupament d'experimentació en diversos camps de l'enginyeria química, evitant així l'impacte social.
- Reducció, dintre de les possibilitats experimentals, del nombre de focs a realitzar per tal de minimitzar les emissions a l'atmosfera.

Fase d'anàlisi de resultats

- Gestió ambiental dels residus generats (paper, cartutxos de tinta d'impressora, etc).

